



Felipe César Fonseca Santos

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Projecto e Construção de Sensores de Carga e Deslocamento

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professora Raquel Almeida
Co-orientador: Professor João Cardoso

Presidente: Professor Jorge Pamies Teixeira
Arguente (s): Professor António Urgueira
Vogal (ais): Professora Raquel Almeida
Professor João Cardoso



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2011

Projecto e Construção de Sensores de Carga e Deslocamento.

Copyright © 2011 Felipe César Fonseca Santos

Faculdade Ciências e Tecnologia,

Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer à minha família, nomeadamente aos meus pais por me terem permitido ter chegado onde cheguei a nível escolar e ao meu irmão que me tem acompanhado sempre.

À minha orientadora, a Professora Raquel Almeida, agradeço a sua enorme disponibilidade e o entusiasmo sempre demonstrado ao longo deste trabalho. Agradeço também o partilhar de muitos conhecimentos e a constante ajuda sempre que necessitei.

Ao meu co-orientador, o Professor João Cardoso, agradeço também a sua enorme disponibilidade e o partilhar de novos conhecimentos, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Pamies Teixeira, pelo disponibilizar de conhecimentos enriquecedores para o trabalho e por disponibilizar equipamentos fundamentais para a construção dos sensores.

À Professora Carla Machado, agradeço a sua enorme disponibilidade e colaboração na construção do sensor de carga. Agradeço também o partilhar de muitos conhecimentos e a constante ajuda sempre que necessitei.

Aos técnicos das oficinas do DEMI da FCT, nomeadamente o Senhor António Campos e ao Senhor Paulo Magalhães, pelo enorme companheirismo e pelos ensinamentos partilhados sobre as operações de maquinaria.

Quero agradecer ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), pelo disponibilizar das instalações e equipamentos necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

Por fim e não menos importante quero agradecer aos meus amigos por tudo o que representaram para mim e por tudo o que me ajudaram não só neste trabalho mas também durante a minha formação superior.

Resumo

O presente trabalho tem como objectivo a concepção, implementação e calibração de dois sensores destinados a equipar uma máquina de ensaios de tracção e de compressão actualmente existente na FCT-UNL: um sensor de carga e outro de deslocamento. Com estes sensores pretendem-se obter valores mais precisos da extensão e da força axial (tracção ou compressão), nos provetes ensaiados, do que os obtidos com o equipamento já existente na máquina de ensaios.

A construção dos sensores é conceptualmente simples, pois ambos consistem em elementos estruturais deformáveis sob acção de forças aplicadas, sobre os quais são colados extensómetros eléctricos. A medida das deformações a que os sensores estão sujeitos pode ser posteriormente convertida na grandeza que se pretende obter: força ou deslocamento.

Um elemento essencial dos sensores é o extensómetro eléctrico. A sua principal função é traduzir a variação de deformação que ocorre à superfície da peça em variação de resistência eléctrica. Através da utilização de uma ponte extensometrica e de um programa, especialmente elaborado para o efeito, em ambiente Labview, a variação de resistência dos extensómetros, colocados nos sensores, é convertida em força ou deslocamento consoante estejamos a falar, respectivamente, do sensor de força ou de deslocamento.

Palavra-chave: Sensor, Carga, Deslocamento, Extensómetros, Ponte de Wheatstone.

Abstract

The objective of the presente work is the objective to design, implementation and calibration of two sensors fitted to a tensile e and compression test machine existing in the FCT-UNL: a load sensor and a displacement sensor. With these sensors it is intended to get more precise values of extension and axial force (tension or compression) in the samples tested, than those obtained with the equipment already in the testing machine.

The construction of the sensors is conceptually simple, since both consist of structural elements deformable under the action of applied forces, on which are glued electrical strain gauges. The measure of deformation that the sensors are subject can be later converted into the quantities that sought: force or displacement.

An essential element of the sensors is the electrical strain gauge. Its main function is to translate the variation in deformation that occurs on the part surface into variation in electrical resistance. By using a strain gage bridge and a program especially designed for this purpose in Labview environment, the resistance variation of strain gauges, placed in the sensors, is converted to force or displacement, respectively by the force sensor or the displacement sensor.

Keywords: Sensor, load, displacement, strain gauges, Wheatstone Bridge.

Índice

Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Tabelas	xi
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Símbolos.....	xv
Capítulo 1	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objectivos	1
1.3 Organização do documento.....	1
1.4 Revisão bibliográfica	2
1.4.1 Extensometria.....	2
1.4.2 Ponte de Wheatstone	4
1.4.3 Sensor de carga	7
1.4.4 Sensor de deslocamento	8
Capítulo 2.....	11
2.1 Máquina de ensaios de tracção e de compressão	11
2.2 Funcionamento da máquina de ensaios de tracção e de compressão	12
2.3 Sensor de carga	13
2.3.1 Sensor de Carga -Paralelepipedico.....	14
2.3 Sensor de Carga – Anel.....	26
2.4 Sensor de Carga – Octaédrico V.1	31
2.4 Sensor de Carga – Octaédrico V.2	34
2.5 Sensor de Carga – Octaédrico V.3	37
2.6 Sensor de Deslocamento	41
2.6.1 Sensor de Deslocamento	41
Cálculo do segundo momento de área da secção da lâmina:	41
Capítulo 3.....	45
3.1 Ferramentas informáticas	45
3.1.1 SolidWorks.....	45
3.1.2 ANSYS	45
3.1.3 Labview.....	46
3.2 Sensor de Carga – Octaédrico V.3	46
3.3 Sensor de Deslocamento	49
Acessório do sensor de deslocamento.....	50
3.5 Colagem dos extensómetros.....	51
Capítulo 4.....	61
4.1 Sensor de deslocamento	61
4.1.1 Ensaio de carga	62
4.1.2 Ensaio de descarga	64
4.2 Sensor de Carga	67

4.2.1 Ensaio de carga	67
4.2.2 Ensaio de descarga	69
4.3 Carga e deslocamento residual	72
Capítulo 5	73
5.1 Montagem	73
5.1.1 Montagem do sensor de carga	73
5.1.2 Montagem do sensor de deslocamento	74
5.1.3 Montagem final	75
5.2.1 Ensaio de um provete de cobre	76
5.2.1 Ensaio de um provete de latão	77
5.2.3 Ensaio de um provete de aço	78
Capítulo 6	81
6.1 Conclusões	81
6.2 Trabalhos futuros	82
7 Bibliografia	83
8 Anexos	85
1 Representação da máquina de ensaios de tracção/compressão	87
2 Desenho do veio passante	89
3 Material de análise	91
4 Desenho do sensor paralelepipedico	93
5 Lista de comandos do sensor paralelepipedico	95
6 Desenho do anel de carga	101
7 Lista de comandos do anel de carga	103
8 Desenho do sensor octaedrico V.1	105
9 Lista de comandos do sensor octaedrico V.1	107
10 Desenho do sensor octaedrico V.2	115
11 Lista de comandos do sensor octaedrico V.2	117
12 Desenho do sensor octaedrico V.3	125
13 Material de construção do sensor de carga V.3	127
14 Desenho do sensor de deslocamento	129
15 Desenho do acessório do sensor de deslocamento	131
16 Ligação dos extensómetros do sensor de carga em ponte completa de Wheatstone	133
17 Ligação dos extensómetros do sensor de deslocamento em ponte completa de Wheatstone	135
18 Diagrama de blocos do programa realizado em Labview	137
19 Painel frontal do programa realizado em Labview	139

Índice de Tabelas

<i>Tabela 4.1 – Ensaio de carga/ calibração do sensor de deslocamento.</i>	62
<i>Tabela 4.2 – Ensaio de descarga/ calibração do sensor de deslocamento.</i>	64
<i>Figura 4.3 – Curva de calibração do ensaio de descarga do sensor de deslocamento.</i>	65
<i>Tabela 4.3 – Ensaio de carga/calibração sensor de carga.</i>	68
<i>Tabela 4.4– Ensaio de descarga/calibração sensor de carga.</i>	70
<i>Tabela 3.1 – Características mecânicas do aço AISI 1020.</i>	91
<i>Tabela 13.1 – Composição química do aço G12 RED 60.</i>	127
<i>Tabela 13.2– Características mecânicas do aço G12 RED 60.</i>	127

Lista de Figuras

Figura 1.1 Alongamento de um elemento estrutural devido à acção de uma força de tracção. Retirado de [1].	3
Figura 1.2 Extensómetro eléctrico. Retirada de [1].	3
Figura 1.3 Ponte de Wheatstone. Retirada de [3].	5
Figura 1.8 Ponte completa de Wheatstone. Retirada de [3].	6
Figura 1.9 Montagem em um quarto ponte de Wheatstone. Retirada de [3].	6
Figura 1.10 Montagem em meia ponte de Wheatstone. Retirada de [3].	6
Figura 1.11 Anel de carga. Retirada de [5].	7
Figura 1.12 Sensor octaédrico simples. Retirada de [5].	7
Figura 1.13 Sensor octaédrico de face larga. Retirada de [5].	7
Figura 1.14 - Sensor de deslocamento. Retirada de [6].	9
Figura 1.15 Sensor de deslocamento de uma viga. Retirada de [7].	9
Figura 1.16 Sensor de deslocamento de duas vigas. Retirada de [7].	9
Figura 2.1 - Máquina de ensaios de tracção/compressão.	11
Figura 2.2 – Componentes da máquina.	12
Figura 2.3 – Funcionamento da máquina de ensaio.	12
Figura 2.5 - Ensaio de Compressão.	14
Figura 2.4 - Ensaio de tracção.	14
Figura 2.6- Sensor paralelepipedico.	14
Figura 2.7 - Dimensões do sensor paralelepipedico (mm).	15
Figura 2.8 – Dimensões do veio passante (mm).	15
Figura 2.9- Coluna/condições de fronteira. Retirada de [8].	16
Figura 2.10- Dimensões da coluna (mm).	16
Figura 2.11 – Secção transversal da coluna (m).	17
Figura 2.12 – Carregamento na viga e no sensor.	18
Figura 2.13 – Secção transversal da viga	19
Figura 2.14 – Cálculo do momento flector	19
Figura 2.15-Factor de concentraçao de tensões. Retirada de [8].	20
Figura 2.16-Novas dimensões do sensor paralelepipedico (mm).	21
Figura 2.17 – Malha de elementos finitos do modelo numérico do sensor paralelepipedico (Simulation).	22
Figura 2.18 – Condições fronteira e carregamento do sensor paralelepipedico.	23
Figura 2.19 - Malha de elementos finitos do modelo numérico do sensor paralelepipedico (ANSYS).	24
Figura 2.20 - Análise linear por contacto.	24
Figura 2.21 – Sensor paralelepipedico e tensões de Von Mises.	25
Figura 2.22 – Sensor paralelepipedico e tensões normais (σ_{yy}) no plano perpendicular ao eixo vertical (eixo y da figura)	25
Figura 2.23 – Anel de Carga e o local onde se irá colar os extensómetros.	26
Figura 2.24 – Anel de carga e dimensões (mm).	27
Figura 2.25 - Malha de elementos finitos do modelo numérico do anel de carga (ANSYS).	28
Figura 2.26 - Condições fronteira e carregamento do anel de carga	28
Figura 2.27- Anel de carga e tensões de Von Mises.	29
Figura 2.28 – Anel de carga e tensões normais (σ_{yy}) no plano perpendicular ao eixo vertical (eixo x da figura).	29
Figura 2.29 – Area de contacto entre o anel de carga e o cabeçote superior.	30
Figura 2.30 - Sensor octaédrico V.1.	31
Figura 2.31 – Dimensão dos sensor octaédrico V.1 (mm).	32
Figura 2.32 - Malha de elementos finitos do modelo numérico do sensor octaédrico V.1 (ANSYS).	33
Figura 2.33 – Sensor octaédrico V.1 e Tensões de Von Mises.	33
Figura 2.34 – Sensor octaédrico V.2.	34
Figura 2.35 – Dimensões do sensor octaédrico V.2.	35
Figura 2.36 - Malha de elementos finitos do modelo numérico do sensor octaédrico V.2 (ANSYS).	35
Figura 2.37- Sensor octaédrico V.2 e tensões de Von Mises.	36
Figura 2.38 – Sensor octaédrico V.2 e tensões normais (σ_{yy}) no plano perpendicular ao eixo vertical (eixo y da figura).	37
Figura 2.39 Sensor de carga octaédrico V.3.	38
Figura 2.40 – Dimensões do sensor octaédrico V.3 (mm).	38

Figura 2.41 – Malha de elementos finitos do modelo numérico do sensor octaédrico V.3 (Simulation).	39
Figura 2.42 – Sensor de carga octaédrico V.3 e tensões de Von Mises.	40
Figura 2.43 – Sensor octaédrico V.3 e tensões normais (σ_{yy}) no plano perpendicular ao eixo vertical (eixo y da figura).	40
Figura 2.44 – Momento de inércia das lâminas do sensor de deslocamento.	41
Figura 2.45 – Cálculo da força na lâmina do sensor de deslocamento.	42
Figura 2.46 – Cálculo do momento flector.	42
Figura 3.1 – Sensor de Carga V.3 depois de maquinado.	46
Figura 3.2 – Sangramento do sensor de carga.	47
Figura 3.3 – Maquinação das faces do sensor de carga.	48
Figura 3.4 – Sensor de deslocamento.	49
Figura 3.5 – Desenhos Sensor de deslocamento.	50
Figura 3.6 – Acessório do sensor de deslocamento.	50
Figura 3.7 – Mecanismo de calibração do sensor de deslocamento.	51
Figura 3.8 – Extensómetro EA-06-125BZ-350/LE.	52
Figura 3.9 – Marcação dos eixos.	53
Figura 3.10 – Colagem dos extensómetros no sensor de carga.	54
Figura 3.11 – Sensores de carga e deslocamento com os extensómetros colados, respectivamente.	55
Figura 3.12 – Sensor de carga e de deslocamento, respectivamente.	55
Figura 3.13 – Esquema e etapas do programa em Labview.	56
Figura 3.14 – Etapa 1 do programa em Labview.	57
Figura 3.15 – Etapas 2, 3 e 4 do programa em Labview.	58
Figura 3.16 – Etapas 5, 6 e 7 do programa em Labview.	58
Figura 3.17 – Etapa 8 do programa em Labview.	59
Figura 3.18 – Botão stop do painel frontal do programa em Labview.	59
Figura 3.19 – Etapa 10 do programa em Labview.	60
Figura 3.20 – Botão de escrita de ficheiro do painel frontal do programa Labview.	60
Figura 4.1 – Mecanismo de calibração.	61
Figura 4.2 – Curva de calibração do ensaio de carga do sensor de deslocamento.	63
Figura 4.3 – Curva de calibração do ensaio de descarga do sensor de deslocamento.	65
Figura 4.4 – Curvas de calibração do sensor de deslocamento.	66
Figura 4.5 – Acessório montado no sensor de deslocamento.	66
Figura 4.6 – Local onde foi realizado os ensaios de calibração do sensor de carga.	67
Figura 4.7 – Movimento/ensaio de carga de calibração do sensor de carga.	67
Figura 4.8 – Curva de calibração do ensaio de carga do sensor de carga.	68
Figura 4.9 – Curva de calibração do ensaio de carga do sensor de carga.	69
Figura 4.10 – Curva de calibração do ensaio de descarga do sensor de carga.	70
Figura 4.11 – Curvas de calibração do sensor de carga.	71
Figura 5.1 – Montagem do sensor de carga.	73
Figura 5.2 – Desenho de um provete.	74
Figura 5.3 – Montagem do sensor de deslocamento.	74
Figura 5.4 – Montagem do acessório no sensor de deslocamento.	75
Figura 5.5 – Montagem final dos sensores e provete na máquina de ensaios de tracção e compressão.	75
Figura 5.6 – Ensaio de tracção de um provete de cobre.	76
Figura 5.7 – Provede de cobre traccionado.	76
Figura 5.8 – Ensaio de tracção do provede de latão.	77
Figura 5.9 – Provede de latão traccionado.	78
Figura 5.10 – Ensaio de tracção do provede de aço.	79
Figura 16.2 – Numeração das faces do sensor de carga.	133
Figura 16.3 – Ligação dos fios na ponte completa de Wheatstone do sensor de carga.	133
Figura 16.1 – Esquema de ligação em ponte completa de Wheatstone para o sensor de carga.	133
Figura 17.3 – Ligação dos fios na ponte completa de Wheatstone do sensor de deslocamento.	135
Figura 17.2 – Numeração das faces do sensor de deslocamento.	135
Figura 17.1 – Esquema de ligação em ponte completa de Wheatstone para o sensor de deslocamento.	135

Lista de Símbolos

ε	Deformação
ΔL	Diferença de comprimento
L	Comprimento do fio
R	Resistência
ρ	Resistividade do fio
A	Área da secção transversal
V_A	Tensão à saída da ponte de Wheatstone
V_E	Tensão de excitação da ponte de Wheatstone
R_1, R_2, R_3 e R_4	Resistências que compõem a ponte de Wheatstone
P_{crit}	Carga crítica
E	Módulo de elasticidade
I	Segundo momento de área
L_{eq}	Comprimento da encurvadura
I_y	Segundo momento de área no eixo yy
I_x	Segundo momento de área no eixo xx
σ_{ad}	Tensão admissível
σ_{ced}	Tensão de cedência
Q	Carga distribuída
M_f	Momento flector
K	Factor de concentração de tensão
y	Maior distância à superfície neutra
R_{furo}	Raio do furo
B	Largura da viga
t	Altura da viga
$y_{m\acute{a}x}$	Deslocamento máximo transversal à viga
F	Força
M	Momento
σ	Tensão
R^2	Estatística: Coeficiente de determinação
ΔF	Diferença de forças
l_0	Distância entre as lâminas do sensor de deslocamento
E_{exp}	Módulo de elasticidade experimental
E_{corr}	Módulo de elasticidade correcto

Capítulo 1

1.1 Introdução

Usados em diversas aplicações, os sensores são instrumentos que permitem medir forças, momentos, deslocamentos entre outras grandezas. Podem apresentar uma elevada precisão, contudo quanto maior for a sua precisão maior é o seu custo.

Com o objectivo de equipar uma máquina de ensaios de tracção e de compressão existente no Laboratório de Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI), optou-se por construir dois novos sensores, sendo um de força (carga) e o outro de deslocamento.

A máquina em questão já possui sensores e um sistema de recolha de dados. Porém este sistema não apresenta no entanto a precisão pretendida.

O trabalho desenvolvido consiste no projecto dos dois sensores que é feito com o auxílio de ferramentas computacionais, Solidworks e Ansys, que permitem criar modelos numéricos detalhados do comportamento.

As soluções finais obtidas foram maquinadas e instrumentadas no DEMI, tendo de seguida sido elaborado um programa em Labview para permitir a aquisição e tratamento dos dados. Ambos os sensores foram calibrados e em seguida foram realizados vários ensaios para validar o seu correcto funcionamento.

1.2 Objectivos

Pretende-se com esta dissertação conceber construir e ensaiar um sensor de carga e outro de deslocamento para melhorar a máquina de ensaios de tracção/compressão existente no Laboratório de Mecânica Estrutural, de forma a possibilitar a medição da extensão e da força axial em provetes ensaiados nessa máquina.

1.3 Organização do documento

A presente dissertação requer a aplicação de conhecimentos característicos de duas áreas fundamentais da Engenharia Mecânica: Mecânica Estrutural e a Instrumentação.

Dado este trabalho ser maioritariamente experimental, a dissertação consiste em grande parte na descrição dos processos de elaboração dos sensores. Como tal se lista abaixo na descrição dos vários capítulos:

- **Capítulo 1-** Introdução: Resumo, Objectivos, Organização do documento e a Revisão Bibliográfica.
- **Capítulo 2-** Neste capítulo descrevem-se o funcionamento da máquina de ensaios, e os requisitos do projecto, analisam-se as várias soluções compiladas através da bibliografia e apresenta-se o projecto dos sensores, que é melhorado com o auxílio dos programas SolidWorks (Simulation) e ANSYS.
- **Capítulo 3-** Descreve-se o software utilizado, a produção dos sensores e dos mecanismos utilizados para a sua calibração, o procedimento de colagem dos extensómetros e o programa em Labview desenvolvido para a aquisição e tratamento dos sinais dos sensores.
- **Capítulo 4-** Neste capítulo é apresenta-se todo o processo de calibração dos sensores.
- **Capítulo 5-** Montagem e Resultados obtidos.
- **Capítulo 6-** Conclusões.

1.4 Revisão bibliográfica

Neste subcapítulo é feita uma breve abordagem sobre a teoria usada ao longo desta dissertação, são ainda referidos alguns artigos considerados relevantes para o projecto dos dois sensores.

1.4.1 Extensometria

Em engenharia mecânica as tensões, os deslocamentos e as extensões são grandezas importantes a ter em conta durante a fase de projecto, estas grandezas podem ser determinadas por várias técnicas, entre elas a experimental.

Entre as técnicas experimentais, a extensometria eléctrica é uma das técnicas mais usadas na indústria e na investigação, pois possui inúmeras vantagens, entre as quais se salientam, o baixo custo, a simplicidade de montagem, precisão dos resultados obtidos, uma vasta gama de aplicações, permitindo até a utilização directa no próprio elemento a ser analisado.

A extensometria é uma técnica experimental que utiliza extensómetros de resistência eléctrica ligados a um equipamento que permite obter a deformação a que um extensómetro está sujeito, quando o modelo onde foi colocado é submetido a um dado carregamento. Isto é conseguido através da medição

da diferença de potencial gerada pela variação da sua resistência eléctrica, que é função da variação do seu comprimento, característica essencial para a utilização dos extensómetros.

Alongamento

A variação de comprimento, também chamado na literatura, por alongamento (ΔL) de um elemento estrutural resulta normalmente da acção de uma força, que provoca a deformação desse elemento, figura 1.1. O alongamento pode corresponder a um aumento ou uma diminuição de comprimento, consoante a força aplicada seja de tracção ou de compressão.

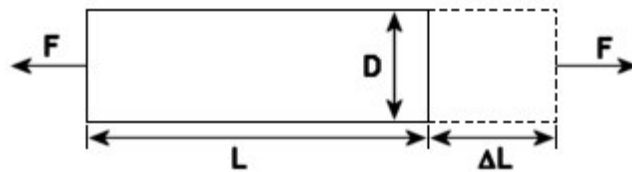


Figura 1.1 Alongamento de um elemento estrutural devido à acção de uma força de tracção. Retirado de [1].

A extensão (ϵ) é definida pelo quociente da divisão do alongamento (ΔL) pelo comprimento unitário (L), eq. (1.1).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.1)$$

A extensão é um número adimensional e na prática a ordem de grandeza, para os metais de utilização corrente como o aço, é da ordem dos 10^{-6} .

Extensómetro

O extensómetro eléctrico é composto por um fio metálico fino, que é sensível à sua deformação longitudinal, disposto em forma de grelha e revestido por um papel igualmente fino, conforme é ilustrado na figura 1.2.

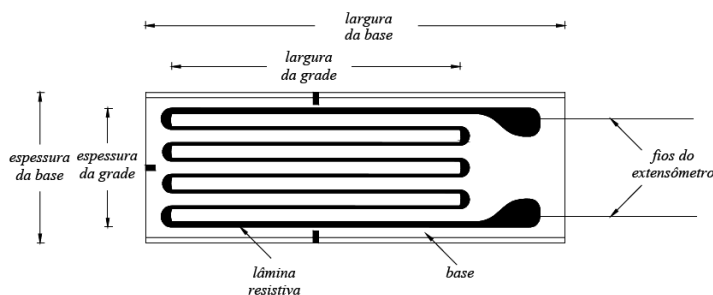


Figura 1.2 Extensómetro eléctrico. Retirada de [1].

O funcionamento do extensómetro baseia-se na propriedade que o fio apresenta de variar a sua resistência eléctrica quando se deforma. Em [2], o autor enuncia que durante a deformação, o aumento do comprimento do fio é acompanhada pela diminuição da área da secção transversal e vice-versa. Adicionalmente, a resistividade do fio também pode variar, a variação de um destes três factores produz a variação da resistência eléctrica do fio, conforme a eq. 1.2.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1.2)$$

A variação da resistência em função da variação do comprimento do fio mede a sensibilidade do extensómetro, k , visível na eq.1.3. O factor do extensómetro pode variar entre 2 e 3.5 para os extensómetros constituídos por fios metálicos e à volta de 100 para os extensómetros semicondutores, este factor é indicado pelos fabricantes.

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (1.3)$$

Ao combinar a eq.1.1, com a definição do factor do extensómetro, surge uma relação entre a variação da resistência em função da extensão, equação 1.4.

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad (1.4)$$

1.4.2 Ponte de Wheatstone

O circuito eléctrico normalmente usado para medir deformações através de variações de resistência dos extensómetros é a ponte de Wheatstone. Este circuito apresenta uma elevada precisão para pequenas variações de resistências, em contraste com o outro método que utiliza um ohmímetro, que não permite detectar variações de resistência da ordem da sexta casa decimal.

O autor em [2] enuncia a solução para a dificuldade em medir pequenas variações. A solução consiste em incorporar o extensómetro num circuito eléctrico sensível à variação de corrente do extensómetro ou à variação de voltagem nos seus terminais, fornecendo assim uma indicação da variação da sua resistência.

A ponte de Wheatstone não só permite detectar pequenas variações de resistência produzidas pelo extensómetro em função da mudança de forma, mas também possibilita o ajuste da tensão (ponto nulo) e a possibilidade de compensar a variação de resistência provocada pela variação da temperatura no extensómetro.

O circuito é constituído por quatro braços, cada um deles possui uma resistência eléctrica (R_1, R_2, R_3 e R_4), ligado aos bornes 1,2,3 e 4, como esquematizado na figura 1.3, também existe a possibilidade de formar arranjos em serie de extensómetros, em cada um dos braços do circuito.

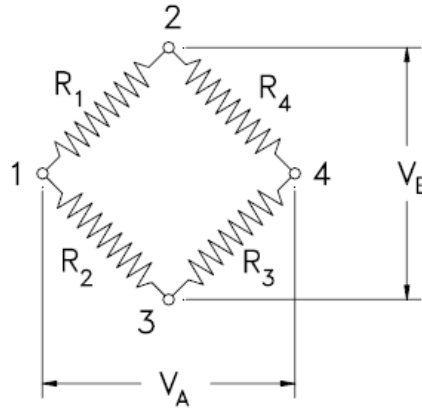


Figura 1.1 Ponte de Wheatstone. Retirada de [3].

Este circuito é alimentado por uma tensão V_E , o sinal de saída é V_A e é medido pelos bornes opostos aos de alimentação. Considerando a lei de Kirchoff e sendo os nós 2 e 3 submetidos a uma diferença de potencial V_E , a diferença de potencial V_A é obtida através da seguinte relação, equação 1.5.

$$V_A = \left(\frac{R_1}{R_2 + R_1} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) V_E \quad (1.5)$$

A ponte de Wheatstone diz-se equilibrada quando se verifica a equação 1.6:

$$\left(\frac{R_1}{R_2 + R_1} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) = 0 \quad (1.6)$$

De onde se verifica a proporcionalidade existente entre resistência eléctricas de cada braço da ponte, equação 1.7:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (1.7)$$

Desta forma, estando a ponte de Wheatstone equilibrada, qualquer variação de resistência em uma ou mais resistências do circuito provocará uma diferença de potencial V_A diferente de zero.

O circuito usado nesta dissertação é a ponte completa (figura 1.8), este possui quatro braços com extensómetros activos e é a ponte que pode apresentar maior sensibilidade, sendo apropriada para eliminar os efeitos da variação de temperatura nos extensómetros.

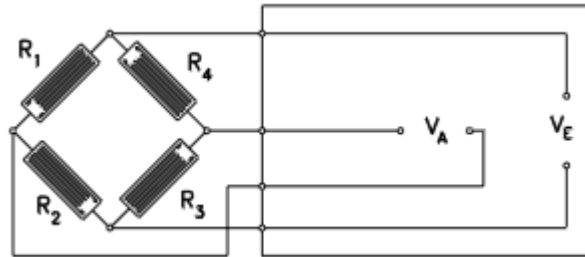


Figura 1.8 Ponte completa de Wheatstone. Retirada de [3].

Para além da ponte completa utilizada neste trabalho, existe outros tipos de configuração da ponte. A montagem da ponte em um quarto e em meia ponte, visível nas figuras 1.9 e 1.10, respectivamente.

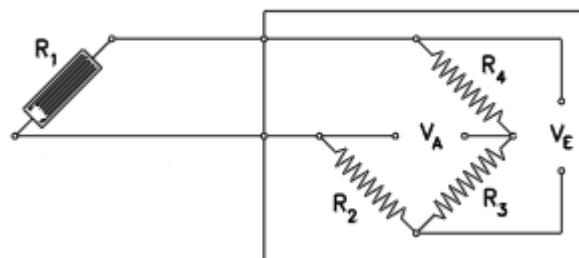


Figura 1.9 Montagem em um quarto ponte de Wheatstone. Retirada de [3].

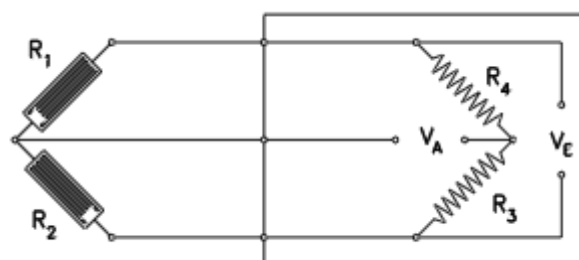


Figura 1.10 Montagem em meia ponte de Wheatstone. Retirada de [3].

Conforme o autor em [4], a montagem em um quarto de ponte utiliza um braço com extensómetros activos e a montagem em meia ponte usa dois braços extensómetros que podem variar a resistência eléctrica. A sensibilidade obtida com as montagens em ponte completa ou meia ponte é, respectivamente, quatro e duas vezes superior à obtida com a montagem simples em quarto ponte.

1.4.3 Sensor de carga

Usado em diversas aplicações, das mais simples às mais complexas, o sensor de carga é um instrumento que pode medir forças e momentos. A sua constituição é bastante simples, pois consiste num elemento estrutural que é deformado quando são aplicados forças ou momentos. As extensões em pontos localizados desse elemento estrutural são medidas utilizando extensómetros eléctricos devidamente colocados. A partir dos valores das extensões são determinadas as forças e momentos aplicados.

Diversos tipos de sensores são apresentados em Cook e Rabinowicz [5], onde é ainda revelado que os sensores de carga mais utilizados são o anel de carga (figura 1.11) e os sensores octaédricos (figuras 1.12 e 1.13).

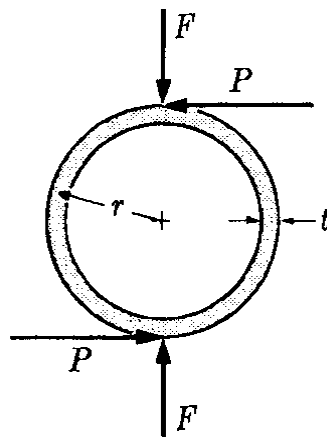


Figura 1.11 Anel de carga. Retirada de [5].

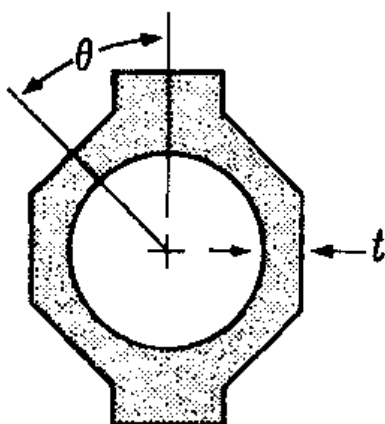


Figura 1.12 Sensor octaédrico simples. Retirada de [5].

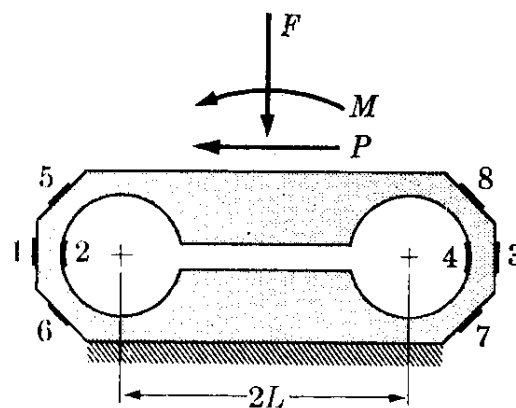


Figura 1.13 Sensor octaédrico de face larga. Retirada de [5].

Os autores revelam que o sensor octaédrico de face larga (figura 1.13) permite medir forças e momentos, o que não se verifica nos sensores octaédricos simples e nos anéis de carga, pois estes só permitem medir forças. No entanto dados os objectivos do trabalho, determinar forças e os constrangimentos dimensionais existentes, esta opção não foi considerada.

Embora a construção do anel de carga seja simples, em comparação com a dos sensores octaédricos, a sua aplicação é reduzida, pois não possui faces planas, ao contrário destes últimos, o que dificulta a aplicação de cargas de compressão.

Cook e Rabinowicz [5], indicam, para os três sensores acima referidos, como devem ser realizadas as ligações da ponte de Wheatstone para a determinação de forças e momentos.

Segundo estes autores, a calibração estática do sensor pode ser efectuada através de cargas conhecidas, tal procedimento irá ser explicado no capítulo onde é apresentado o processo de calibração dos sensores.

1.4.4 Sensor de deslocamento

Utilizado em diversas aplicações, desde a saúde à indústria, os sensores de deslocamento permitem monitorar o movimento de um dispositivo, uma máquina ou no caso deste trabalho o alongamento do provete.

O conceito do sensor de deslocamento é simples, pois consiste numa lâmina, em que uma das extremidades é fixa e a outra extremidade acompanha o movimento do provete, quando este está a ser tracionado. Tal como o sensor de carga, utilizam-se extensómetros, devidamente colocados, nos locais onde pretende medir as extensões. A partir dos valores das extensões é determinado o deslocamento do provete.

No artigo Whan *et al* [6] é apresentado um sensor de deslocamento utilizado na área da Biomecânica, para medir deformações nos ossos. Apesar do sensor de deslocamento a desenvolver se destinar a ensaiar metais pode no entanto construir-se um sensor para esta finalidade usando uma arquitectura semelhante.

O sensor apresentado apresenta uma complexidade reduzida, como pode ser observado na figura 1.14.

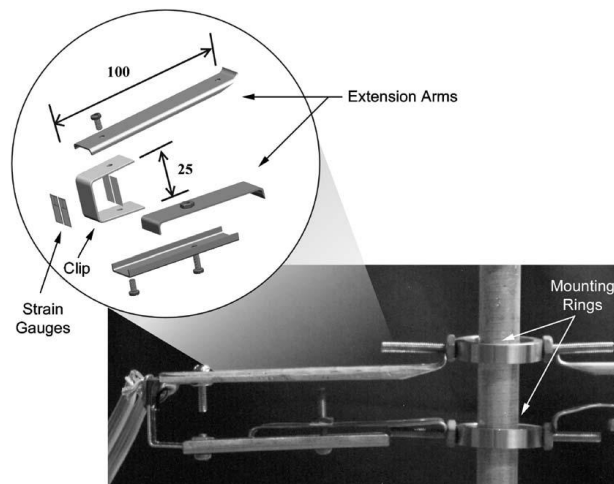


Figura 1.14 - Sensor de deslocamento. Retirada de [6].

Em Fleck [7] são apresentados dois sensores de deslocamento, conforme ilustrado, respectivamente, nas figuras 1.15 e 1.16. Um dos sensores apresentados apresenta complexidade elevada (figura 1.15), já o outro (figura 1.16) é de construção mais simples.

O sensor da figura 1.15 consiste num sensor de um só braço, em quanto o sensor da figura 1.16 apresenta dois braços.

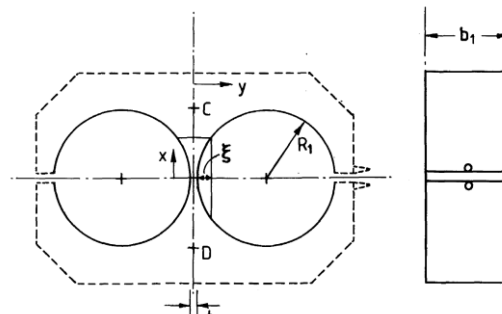


Figura 1.15 Sensor de deslocamento de uma viga. Retirada de [7].

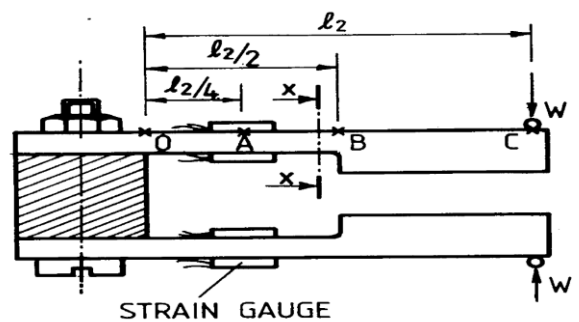


Figura 1.16 Sensor de deslocamento de duas vigas. Retirada de [7].

Capítulo 2

O presente capítulo tem como objectivo descrever o funcionamento da máquina de ensaios de tracção e compressão presente no Laboratório de Mecânica Estrutural, que carece ser instrumentada/melhorada com a aplicação de dois sensores, um de carga e outro de deslocamento. Será ainda apresentado todo o processo de concepção e análise dos projectos dos ditos sensores, bem como os requisitos de projecto a respeitar.

2.1 Máquina de ensaios de tracção e de compressão

Conforme foi referido anteriormente o objectivo principal desta dissertação é equipar a máquina de ensaios de tracção (figura 2.1), presente no Laboratório de Mecânica Estrutural do DEMI, com dois sensores, um sensor de força e outro de deslocamento.

No sistema actual, a força é obtida a partir da pressão de óleo no circuito hidráulico e o deslocamento é medido por um transdutor localizado no cabeçote superior que determina o deslocamento relativo entre o cabeçote superior e o cabeçote intermédio.

A máquina de ensaios de tracção e de compressão possui uma interface USB que possibilita a conexão ao computador e através de um software permite a recolha e tratamento dos dados. Tal como a máquina de ensaios, o sistema de aquisição é proveniente da GUNT.



Figura 2.1 - Máquina de ensaios de tracção/compressão,

2.2 Funcionamento da máquina de ensaios de tracção e de compressão

A máquina que realiza os ensaios de tracção e de compressão é composta por um mecanismo de elevação hidráulico, guias, manípulo e bases, conforme a figura 2.2.

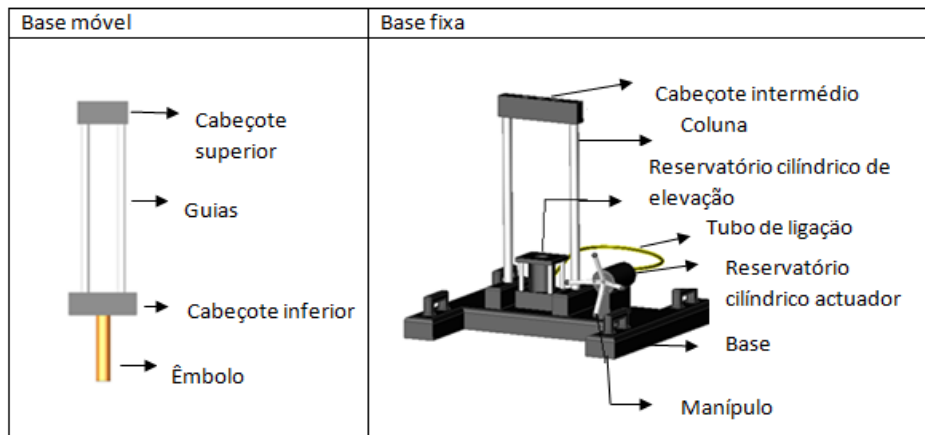


Figura 2.2 – Componentes da máquina.

O manuseamento do mecanismo de elevação, como se pode observar na figura 2.3, é feito rodando o manípulo no sentido dos ponteiros do relógio. Quando este é rodado, comprime o óleo existente do actuador cilíndrico obrigando-o a deslocar-se através de um tubo de ligação, para o cilindro de elevação, que impulsiona o movimento vertical do êmbolo, que por sua vez produz o movimento do conjunto constituído pelos cabeçote superior, inferior e pelas guias, enquanto o cabeçote intermédio encontra-se fixo. Isto permite realizar os ensaios de tracção (entre o cabeçotes superior e intermédio) ou de compressão (entre os cabeçotes intermédio e inferior).

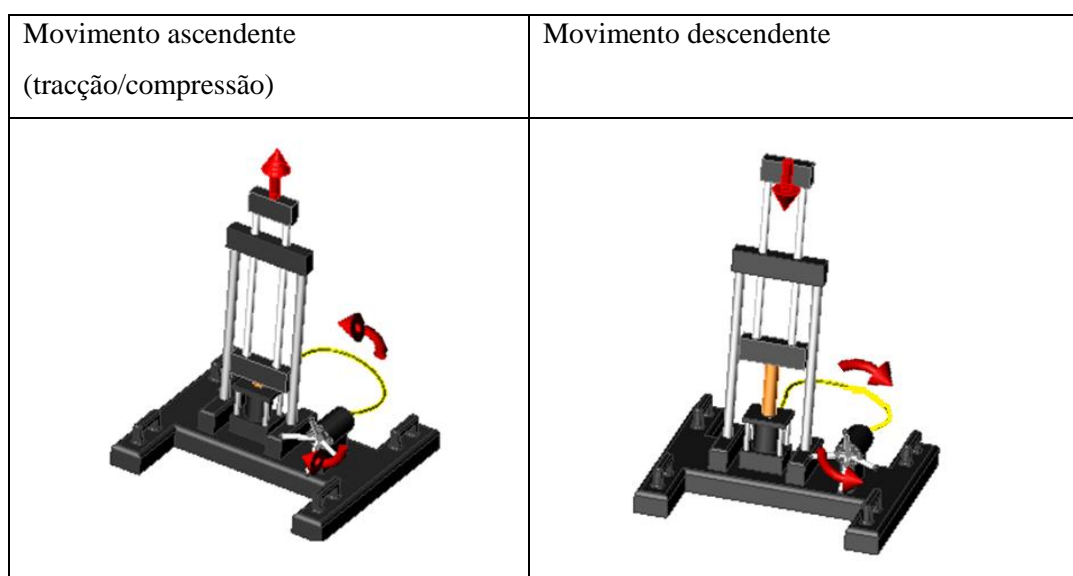


Figura 2.3 – Funcionamento da máquina de ensaio.

Rodando o manípulo no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio (figura 2.3), obtêm-se o movimento descendente dos cabeçotes superior, inferior e o retorno do óleo ao actuador cilíndrico, este movimento serve apenas para posicionar a base móvel de forma a colocar e retirar o provete.

2.3 Sensor de carga

Usado em diversas aplicações, de simples às mais complicadas, o sensor de carga que se pretende construir é um instrumento que vai permitir determinar a força que um provete colocado na máquina de ensaios suporta, esta força pode ser de tracção ou compressão. O princípio de funcionamento deste tipo de sensor bastante simples, consistindo num elemento estrutural que se deforma quando sobre ele é aplicada uma força.

A deformação do sensor é medida, por exemplo, recorrendo a extensómetros eléctricos, e o valor da força aplicada é em seguida calculado, desde que se conheça a relação força-deformação, que é característica de cada sensor e pode ser obtida através da sua calibração.

Antes de iniciar a fase de concepção do sensor devem ser tidos em conta os seguintes aspectos:

- Deve permanecer no domínio elástico suportando uma força máxima de 20kN.
- O tamanho do sensor é limitado pelas dimensões da máquina onde irá ser montado, figura 2.4, 2.5 e anexo 1.
- Tem que funcionar quer em ensaios de tracção quer em ensaios de compressão.
- A ligação do sensor no ensaio de tracção é efectuada através de um veio passante, figura 2.4, servindo de elemento de ligação entre o sensor e o provete, representado em anexo 2.
- No ensaio de compressão, o sensor de carga é apoiado entre os cabeçotes intermédio e inferior, como visível na figura 2.5.

A figura 2.4 evidencia a posição do sensor de carga durante realizado o ensaio de tracção, já a figura 2.5 mostra a posição, quando executado o ensaio de compressão.

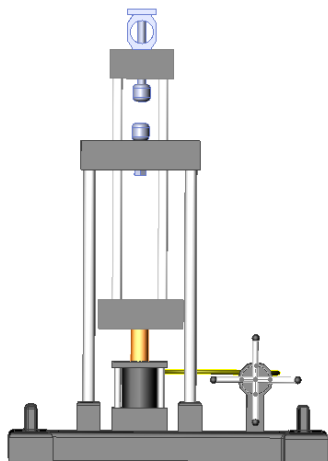


Figura 2.4 - Ensaio de tração.

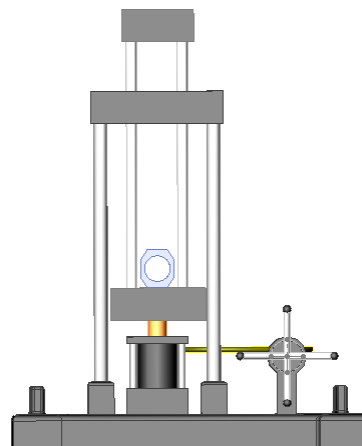


Figura 2.5 - Ensaio de Compressão.

Escolheu-se um aço corrente, AISI 1020, para realizar os estudos do sensor de carga. A característica fundamental deste aço, empregue na análise do sensor de carga, é a tensão de cedência, que apresenta um valor de 350 MPa (no anexo 3 encontram-se apresentadas as suas propriedades mecânicas).

2.3.1 Sensor de Carga -Paralelepipedico

Com base na pesquisa bibliográfica e nas restrições do projecto, resolveu-se iniciar o estudo com o projecto de um sensor paralelepipedico (figura 2.6 e desenho em anexo 4) com dois furos de diferentes diâmetros, conforme pode ser observado na figura 2.7. Este sensor apresenta uma complexidade reduzida.

O furo de menor diâmetro tem como finalidade permitir a ligação entre o veio passante e o provete, já o furo de maior diâmetro deve permitir a colocação dos extensómetros.

Para garantir uma boa fixação entre o sensor e os cabeçotes superior e inferior, o sensor deverá ter espessura igual à dos cabeçotes, ou seja, de 30 milímetros.

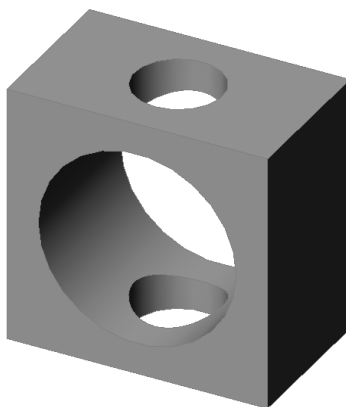


Figura 2.6- Sensor paralelepipedico.

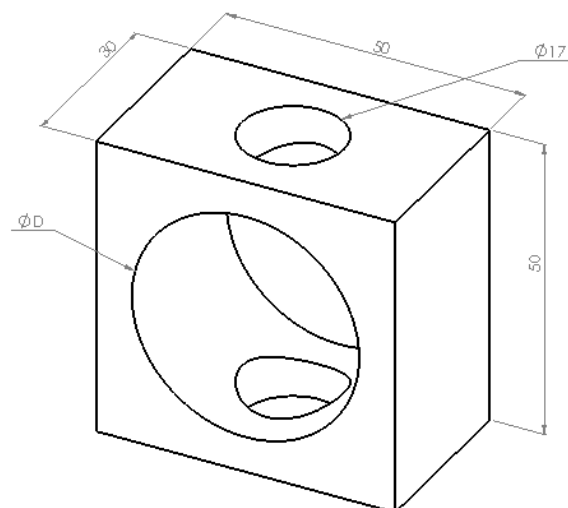


Figura 2.7 - Dimensões do sensor paralelepípedo (mm).

Visto que a máquina de ensaios possui uma dimensão de 63 milímetros entre as guias, resolveu-se admitir uma dimensão de 50 milímetros para a largura e o comprimento do sensor.

O furo de menor diâmetro é condicionado pelo diâmetro do veio passante (figura 2.8 e anexo 2) e pela largura dos cabeçotes superior (para os ensaios de tracção) e inferior (para os ensaios de compressão). O veio passante possui um diâmetro de 15 milímetros e a largura do cabeçote, como já foi anteriormente referida, é de 30 milímetros. Escolhe-se assim um diâmetro de 17 milímetros para o furo, de forma a ter 1 milímetros de folga, garantindo assim que não irá existir contacto entre o veio passante e o sensor de carga durante os ensaios a realizar.

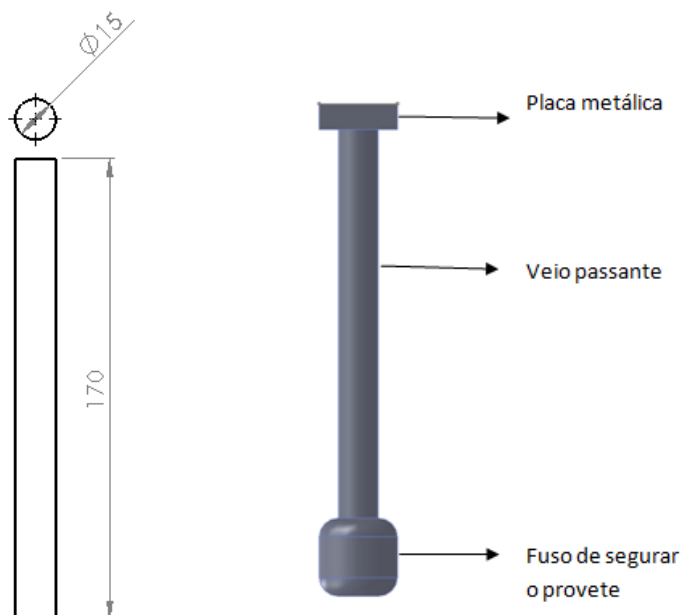


Figura 2.8 – Dimensões do veio passante (mm).

De seguida é realizado o cálculo do diâmetro do maior furo e também da espessura (dimensão mínima entre a face vertical do sensor e o furo de maior diâmetro) do sensor. Considerando que irá ser feita uma análise detalhada do comportamento através do método dos elementos finitos, importa obter uma estimativa preliminar destes valores recorrendo a métodos analíticos mais simples. Por isso considerou-se que as paredes laterais do sensor (ver figuras 2.6 e 2.7) poderiam sofrer colapso devido à encurvadura, por estarem submetidas a elevados esforços de compressão. E que as paredes, superior e inferior, do sensor, estando sujeitas à pressão exercida pela placa metálica ou pelo cabeçote poderiam ficar submetidas a tensões normais devidas à flexão. Analisou-se por isso a estabilidade de uma coluna e as tensões normais devidas à flexão numa viga, que se assumiu representarem de forma simplificada os referidos troços do sensor.

Coluna:

A análise da estabilidade da coluna é realizada com base na *equação de Euler* (equação 2.1), através da equação pretende-se obter a dimensão máxima para altura da coluna, considerando os seguintes aspectos:

- Uma força aplicada de 20 kN, força P, conforme a figura 2.9.
- Condições de fronteira indicadas na figura 2.9.
- Dimensões da coluna ilustrada na figura 2.10.
- Comprimento da encurvadura (L_{eq}) igual à altura da coluna (D).
- Módulo de elasticidade (E) igual a 200 GPa.

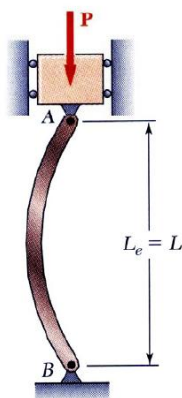


Figura 2.9- Coluna/condições de fronteira. Retirada de [8].

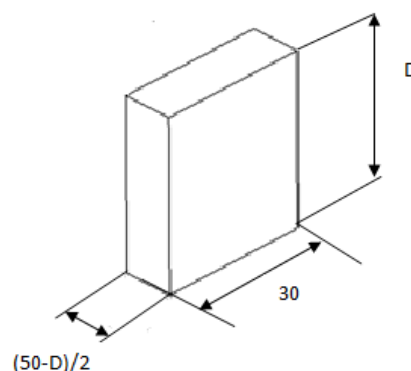


Figura 2.10- Dimensões da coluna (mm).

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{L_{eq}^2} \quad (2.1)$$

$$L_{eq} = D \quad (2.2)$$

Antes de utilizar a fórmula de Euler foi necessário calcular o segundo momento de área em torno dos dois eixos (X e Y), com o objectivo de descobrir em torno de que eixo ocorre a encurvadura da coluna.

Cálculo do segundo momento de área da coluna:

A encurvadura, devido ao carregamento, ocorre em torno do eixo Y representado na figura 2.11, pois $I_y < I_x$.

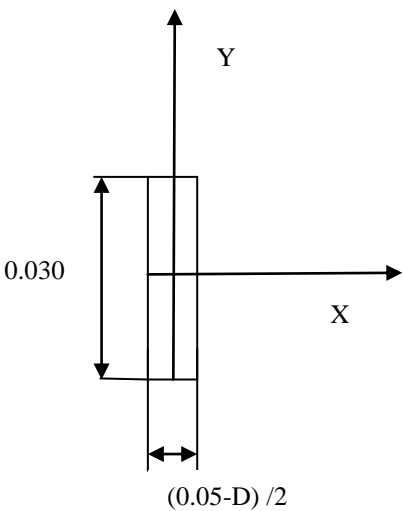
Secção transversal da coluna	
	$I_y = \frac{0.03 * \left(\frac{0.05 - D}{2}\right)^3}{12}$ $I_x = \frac{\frac{0.05 - D}{2} * 0.03^3}{12}$ $I_y < I_x \rightarrow$ $\left(\frac{0.05 - D}{2}\right)^2 < 0.03^2$

Figura 2.11 – Secção transversal da coluna (m).

Aplicando as equações 2.1, 2.2 e o cálculo do momento de inércia, conclui-se que o diâmetro do furo terá que ser inferior a 46 milímetros.

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{eq}^2} \leftrightarrow 20000 = \frac{\pi^2 \times 200 \times 10^9 \times \left(\frac{0.05 - D}{2}\right)^3 \times 0.03}{12 \times D^2} \leftrightarrow D < 0.046m$$

Viga à flexão:

Antes de iniciar a análise da viga à flexão foi preciso definir um factor de segurança (FS), para calcular a tensão admissível (σ_{ad}) a que a viga irá ser sujeita.

$$\sigma_{ad} = \frac{\sigma_{ced}}{FS} \quad (2.3)$$

Com o auxílio da equação 2.3 e admitindo um factor de segurança (FS) de 3, calcula-se a tensão admissível:

$$\sigma_{ad} = \frac{350 \times 10^6}{3} \cong 116.7 \times 10^6 \text{ MPa}$$

O objectivo da análise é obter o valor mínimo da altura da viga, assumindo as seguintes considerações:

- Uma carga distribuída (Q) de 400 kN/m, conforme a figura 2.12.
- Condições de fronteira com um apoio fixo e outro móvel, visível na figura 2.12.
- $L=0.05$ m.

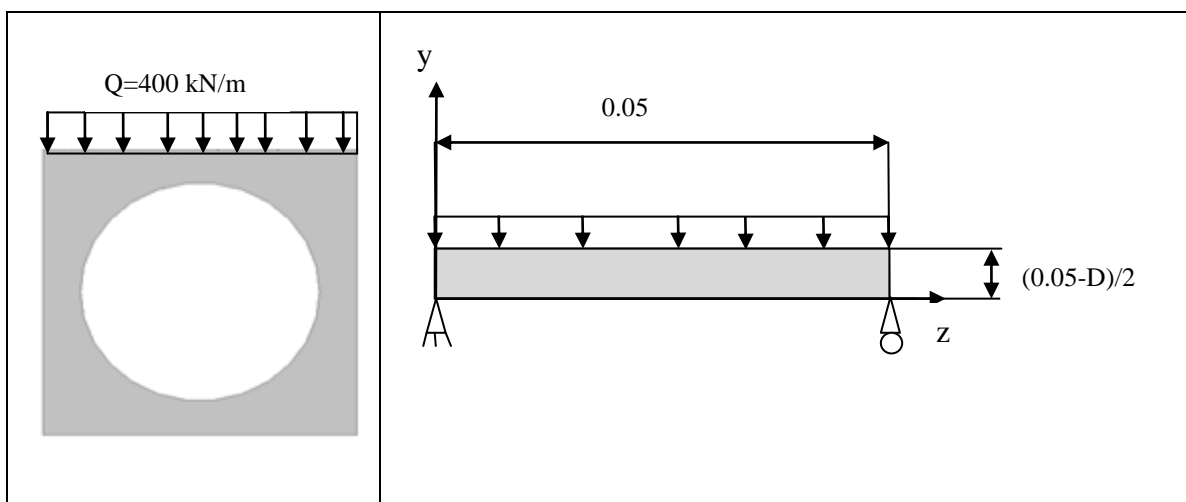


Figura 2.12 – Carregamento na viga e no sensor.

Antes de calcular o valor mínimo da altura da viga, foi necessário descobrir em que eixo ocorre a flexão, o que significa que é necessário calcular o segundo momento de área em torno dos dois eixos (X e Y).

Cálculo do segundo momento de área da viga

A flexão ocorre na viga em torno do eixo X representado na figura 2.13, pois $I_x < I_y$.

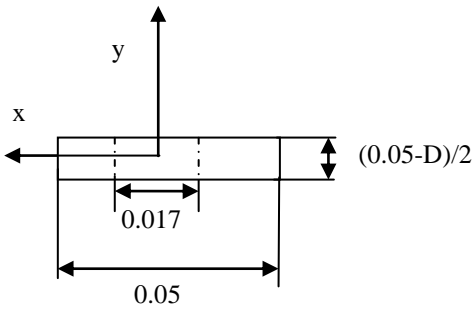
Secção transversal da viga	
	$I_y = \frac{\frac{0.05 - D}{2} * (0.013)^3}{12}$ $I_x = \frac{0.013 * \left(\frac{0.05 - D}{2}\right)^3}{12}$ $I_x < I_y \rightarrow$ $\left(\frac{0.05 - D}{2}\right)^2 < 0.013^2$

Figura 2.13 – Secção transversal da viga

Para calcular a altura mínima da viga, através da equação 2.4, foi necessário calcular o momento flector (M_f) da carga distribuída sobre a viga e o factor de concentração (K) de tensões devido ao furo.

$$\sigma_{ad} = \frac{M_f}{I} Ky \quad (2.4)$$

Cálculo do momento flector

O cálculo do momento flector é realizado com base na figura 2.14.

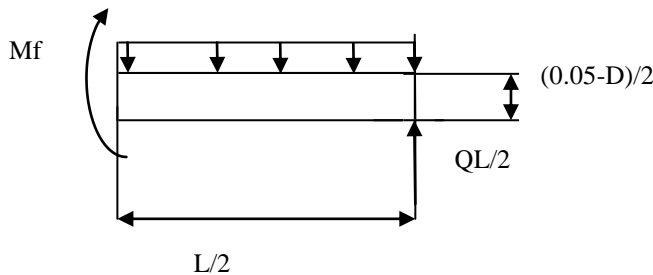
	$M_f = \frac{QL}{2} * \frac{L}{2} - \frac{QL}{2} * \frac{L}{4}$ $M_f = 125 Nm$
---	--

Figura 2.14 – Cálculo do momento flector

Cálculo do factor de concentração, K:

O fenómeno de concentração de tensões ocorre na vizinhança do furo de 17 milímetros da viga, provocando um aumento de tensões, superiores ao valor médio das tensões da viga. O cálculo do factor de concentração é realizado através da visualização do gráfico da figura 2.15 e do quociente (equação 2.5) entre as dimensões do raio do furo ($R_{furo}=8.5$ mm) e a largura da viga ($B=30$ mm).

$$\frac{R_{furo}}{B} \quad (2.5)$$

Depois de efectuado o cálculo do quociente, prossegue-se a leitura do gráfico (figura) com o valor do quociente e retira-se o valor do factor de concentração de tensões (K).

$$\frac{R_{furo}}{B} = \frac{8.5}{30} = 0.283 \approx 0.25 \rightarrow K = 2.4$$

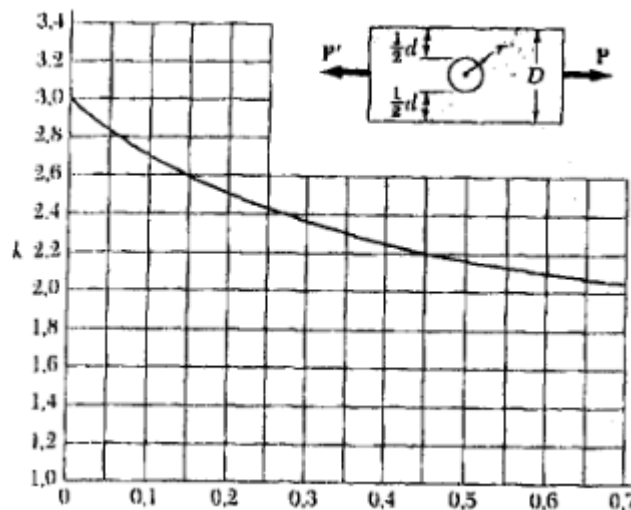


Figura 2.15-Factor de concentração de tensões.
Retirada de [8].

Com o auxílio da equação 2.4, factor de concentração de tensões e com o valor da tensão admissível anteriormente determinado, calcula-se a dimensão do furo de maior diâmetro:

$$\frac{0.05 - D}{2} = t \rightarrow \text{altura da viga}$$

$$\sigma = \frac{M_f}{I_X} Ky \leftrightarrow 116.7 \times 10^6 = \frac{125 \times 2.4 \times \left(\frac{t}{2}\right)}{\frac{1}{12} \times 0.013 \times (t)^3} \rightarrow t > 0.0344m$$

Visto os resultados obtidos, conclui-se:

- A análise de estabilidade de colunas indica que o diâmetro do maior furo terá de ser inferior a 46 milímetros, por sua vez é inferior à limitação da largura do sensor. Por isso qualquer valor de diâmetro menor que 46 milímetros pode ser considerado.
- A análise da viga à flexão revela que a altura da viga terá de ser superior 34.4 milímetros, contudo o sensor apresenta uma limitação de 50 milímetros de largura. Por isso o valor de espessura não pode ser considerado.

Dadas as conclusões obtidas, resolveu-se admitir um valor de diâmetro para o furo maior de 38 milímetros (D), sendo este já um valor perto do limite, dadas as condições existentes, em que ainda possível realizar a colagem dos extensómetros no sensor, e consequentemente um valor de 6 milímetros para a menor secção entre as paredes do sensor e o furo, dimensões representadas na figura 2.16.

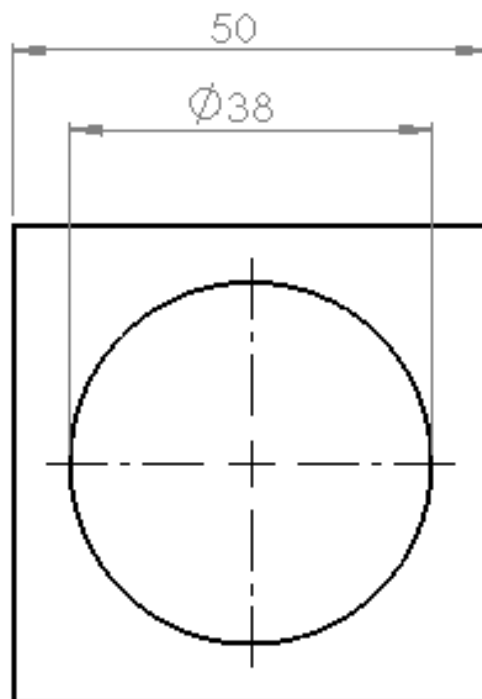


Figura 2.16-Novas dimensões do sensor paralelepípedo (mm).

Sendo assim irá calcular-se, através dos métodos anteriores, o valor da força crítica na coluna e da tensão na viga sujeita à flexão:

Com o D=38 milímetros, vê-se:

Método de estabilidade da coluna	Método da viga sujeita à flexão
$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{eq}^2} \rightarrow P_{crit}$ $= \frac{\pi^2 \times 200 \times 10^9 \times \left(\frac{0.05 - 0.038}{2}\right)^3 \times 0.03}{12 \times 0.038^2}$ $\rightarrow P_{crit} = 738.2 \text{ kN} \ll 20 \text{ kN}$	$\sigma_{ad} = \frac{M_f}{I_x} Ky \leftrightarrow \sigma = \frac{125 \times 2.4 \times \left(\frac{0.006}{2}\right)}{\frac{1}{12} \times 0.013 \times (0.006)^3}$ $\sigma_{ad} = 3.85 \text{ GPa} \gg 116.6 \text{ MPa}$

Dos cálculos anteriores efectuados conclui-se:

- A análise realizada ao sensor através dos modelos de coluna e de viga, são apenas aproximadas pois a secção da coluna e da viga na realidade não são uniformes, não traduzem a realidade.

Para obter valores mais exactos das tensões a que estará sujeito o sensor quando em operação, optou-se por efectuar uma análise de elementos finitos recorrendo ao pacote de programas informáticos, SolidWorks, mas propriamente o Simulation. A malha de elementos finitos utilizada foi através do modo automático, com 12445 nós e 7504 elementos, visível na figura 2.17.

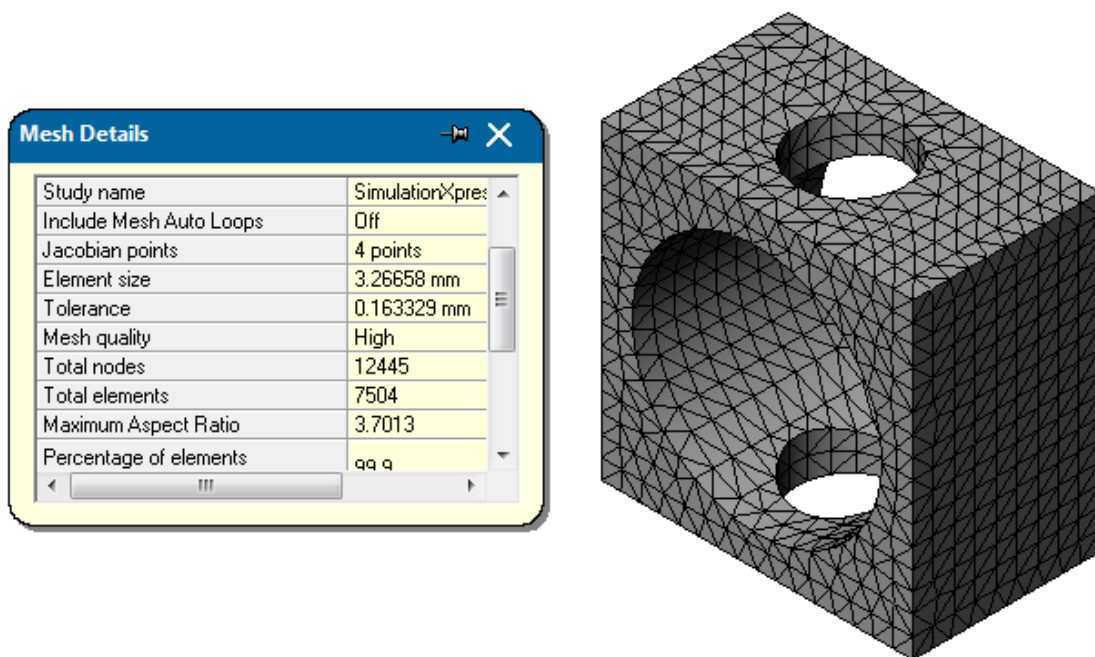


Figura 2.17 – Malha de elementos finitos do modelo numérico do sensor paralelepípedo (Simulation).

A análise do sensor através do Simulation é realizada com uma força de 20 kN distribuída sobre a face superior e com um constrangimento do movimento dos três eixos na face inferior, conforme a figura 2.18.

Com a realização da simulação numérica obtiveram-se os resultados para a tensão de Von-Mises indicados na figura 2.18.

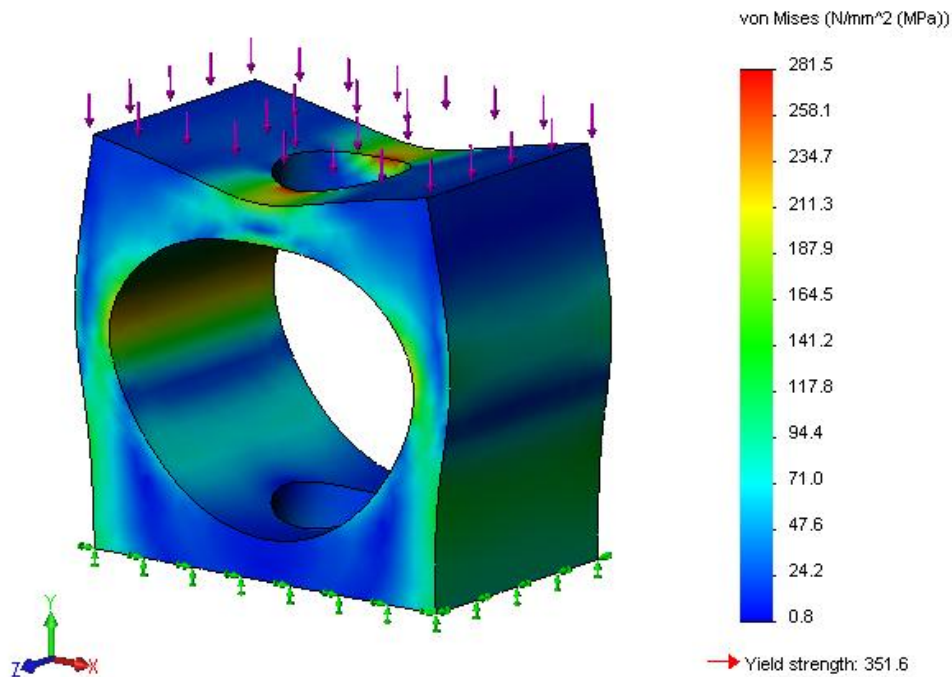


Figura 2.18 – Condições fronteira e carregamento do sensor paralelepípedo.

A análise das tensões de Von Mises obtidas no sensor, representadas na figura 2.18 revela dois factos:

- Verifica-se que a simulação efectuada não representa convenientemente a realidade. Com efeito, tanto as tensões de Von Mises, como as deformações não verificam a simetria do problema em torno do plano horizontal, o que se deve às restrições aplicadas na face inferior.
- O sensor apresenta tensões elevadas junto a periferia do furo de menor diâmetro, o que poderá provocar danos no sensor e o contacto entre o veio passante e o furo.

Para obter um modelo de elementos finitos que permita simulações mais próximas da realidade optou-se por considerar a existência de uma placa, com uma tensão de cedência superior à do material do sensor, que é colocada em contacto com a face superior deste. O sensor está também em contacto com o cabeçote da prensa e por isso foram usados *elementos de contacto* para definir essa ligação.

Esta nova análise foi efectuada recorrendo ao programa de elementos finitos ANSYS (em anexo 5 encontra-se as linhas de comando do programa).

A malha realizada pelo programa para o modelo numérico do sensor paralelepípedo contém elementos triangulares e rectangulares (figura 2.19), com 5091 elementos e 8365 nós.

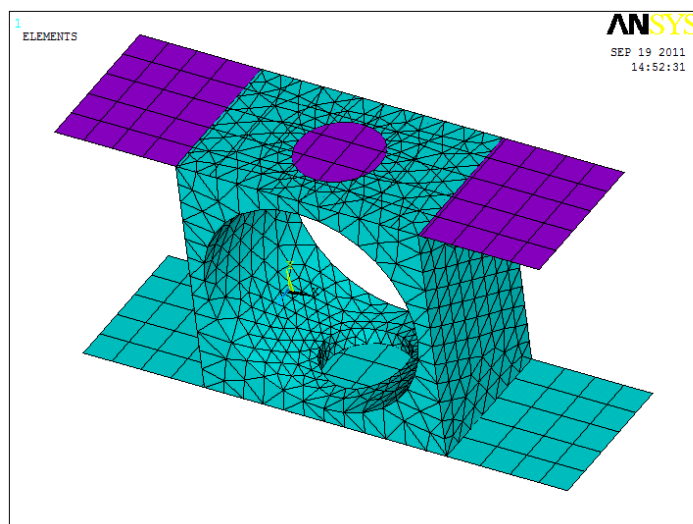


Figura 2.19 - Malha de elementos finitos do modelo numérico do sensor paralelepípedo (ANSYS).

Neste programa as faces da placa e do cabeçote foram modeladas como duas superfícies rígidas. Obtiveram-se tensões e deformações simétricas em relação ao plano horizontal, como ilustra na figura 2.20.

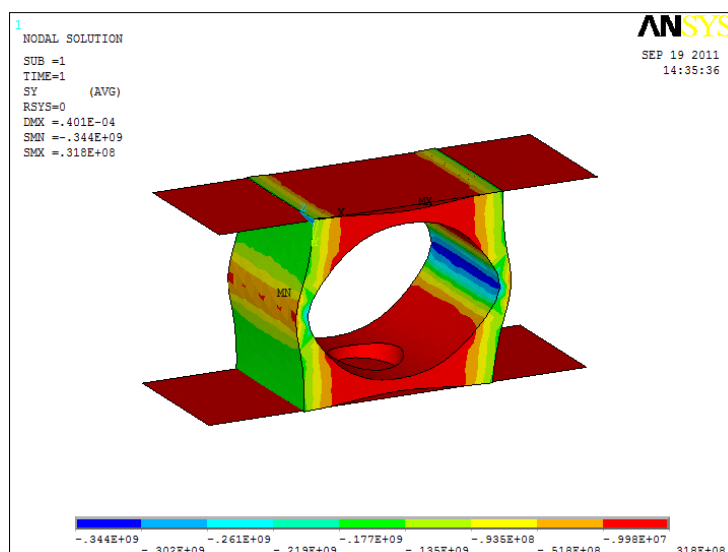


Figura 2.20 - Análise linear por contacto.

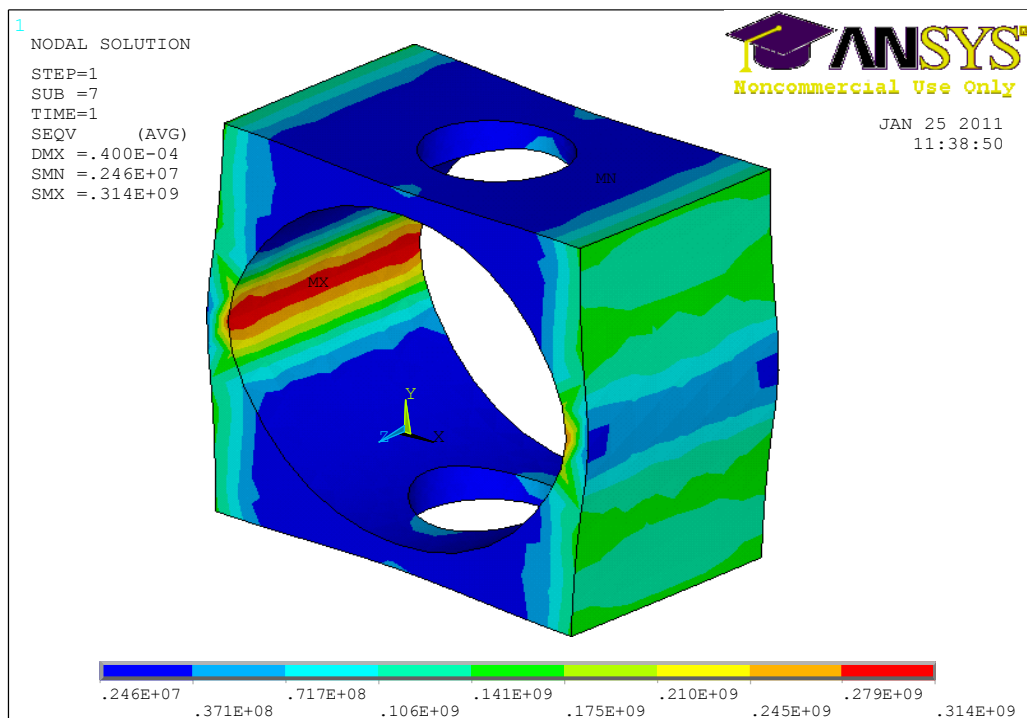


Figura 2.21 – Sensor paralelepédico e tensões de Von Mises.

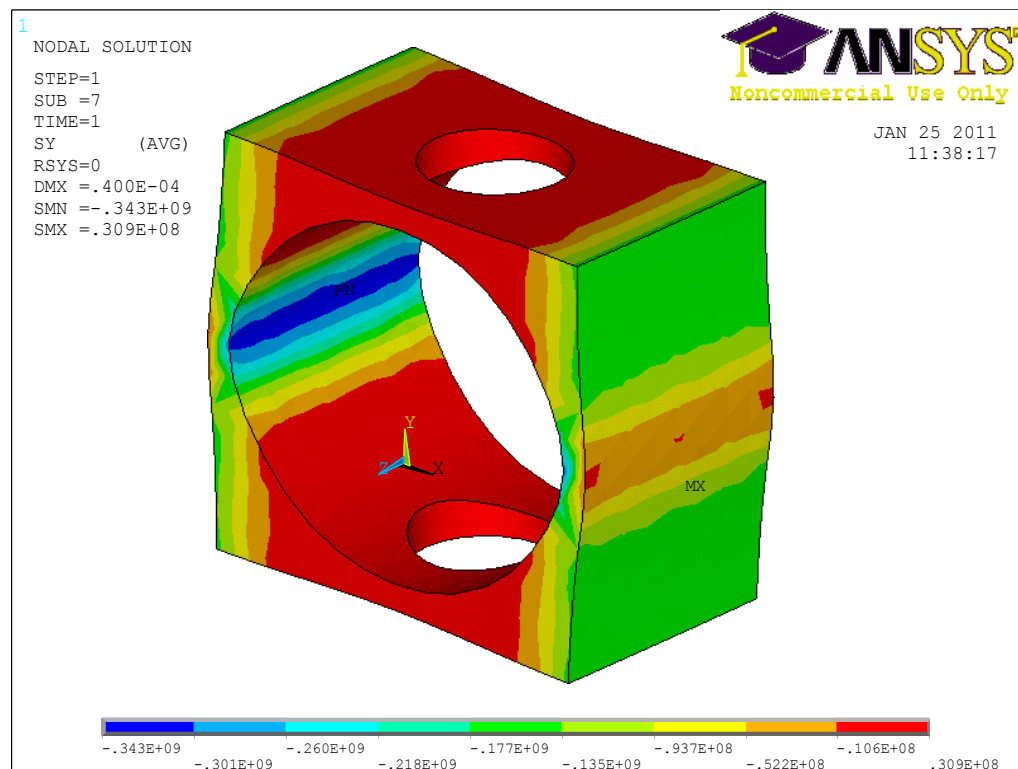


Figura 2.22 – Sensor paralelepédico e tensões normais (σ_{yy}) no plano perpendicular ao eixo vertical (eixo y da figura) .

A análise do sensor permitiu obter as tensões normais no plano perpendicular ao eixo vertical (eixo y na figura) representadas na Figura 2.22 e as tensões de Von Mises, ilustradas na Figura 2.21. Verifica-se que:

- O sensor apresenta tensões elevadas, localizadas no eixo de simetria horizontal do sensor, contudo encontra-se em regime elástico.
- Nas quatro faces que interceptam o plano de simetria horizontal, onde se prevê a colagem dos extensómetros, *o sensor não apresenta tensões de sinal diferente*, ou seja, todos os pontos nesta zona do sensor estão sujeitos à compressão o que torna inviável a ligação dos extensómetros em ponte completa de Wheatstone como era pretendido fazer.

Como consequência das análises ilustradas nas figuras 2.21 e 2.22, a forma paralelepípedica não é aconselhável, pelo que irá ser preterida.

2.3 Sensor de Carga – Anel

Visto que o sensor paralelepípedo, não permite montar uma ponte completa de Wheatstone como era pretendido fazer, resolveu-se analisar o anel de carga (figura 2.23 e anexo 6), com o intuito de obter tensões de diferentes sinais nas faces que interceptam o plano horizontal de simetria, local onde se prevê a colagem dos extensómetros, quadrados a preto visíveis na figura 2.23.

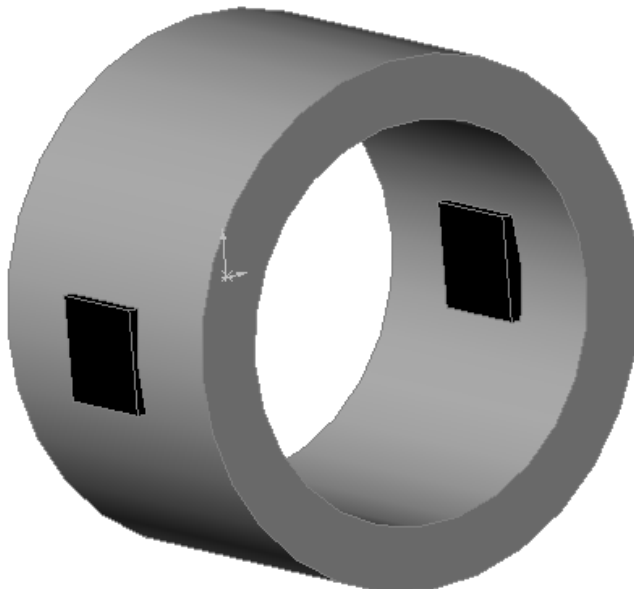


Figura 2.23 – Anel de Carga e o local onde se irá colar os extensómetros.

No projecto do anel de carga foram consideradas as mesmas restrições do sensor paralelepípedo, ou seja, o anel de carga, durante o ensaio de compressão, é colocado entre as guias da base móvel (ver figura 2.5), o que significa que o diâmetro exterior do anel terá de ser inferior a 63 milímetros. Contudo o anel depois de ser deformado assume uma forma oval. Por isso optou-se por um diâmetro exterior do anel de carga de 50 milímetros (figura 2.24), o que permite uma folga entre o anel e as guias depois de aplicado o carregamento.

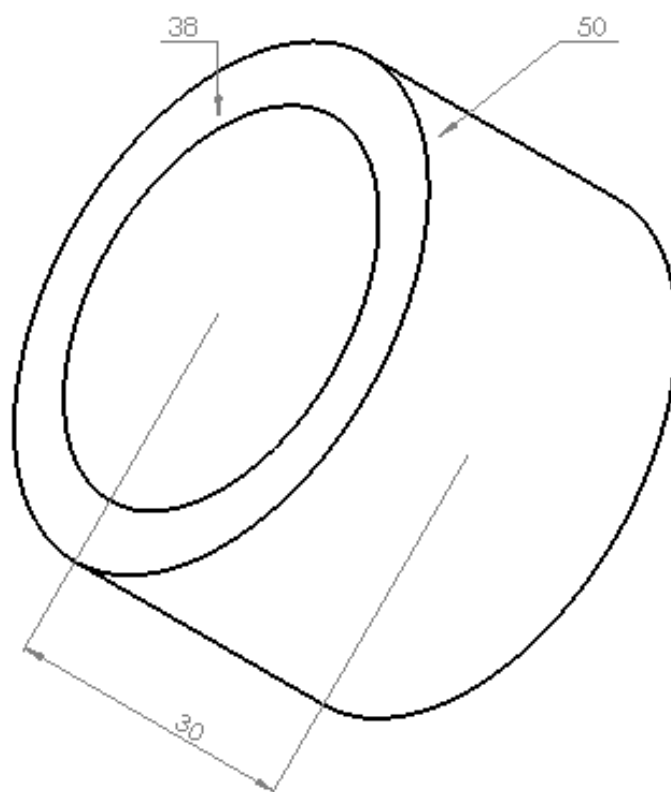


Figura 2.24 – Anel de carga e dimensões (mm).

Para garantir uma área de contacto máxima entre o anel e os cabeçotes superior e inferior, assume-se o valor de 30 milímetros para a largura do anel (figura 2.24), igual à largura dos cabeçotes.

De seguida realiza-se, com o apoio do programa (em anexo 7 encontra-se as linhas de comando do programa) de elementos finitos ANSYS, uma análise linear ao anel, com uma malha constituída por 3256 elementos triangulares 6440 nós, visível na figura 2.25. Obtendo-se as tensões de Von Mises, que estão representadas na figura 2.27 e as tensões segundo o eixo X da figura 2.28.

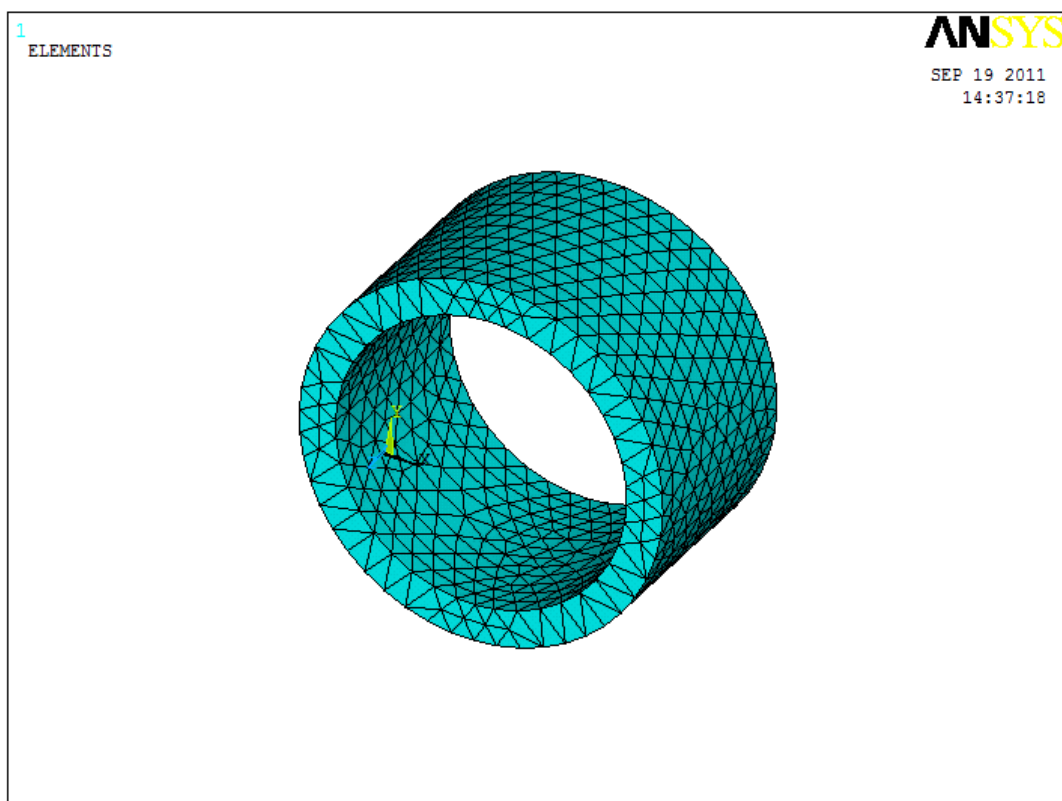


Figura 2.25 - Malha de elementos finitos do modelo numérico do anel de carga (ANSYS).

Para efectuar esta análise, considerou-se uma força de 20 kN distribuída ao longo da linha superior e um constrangimento de deslocamento na linha inferior do sensor, ilustrado na figura 2.26.

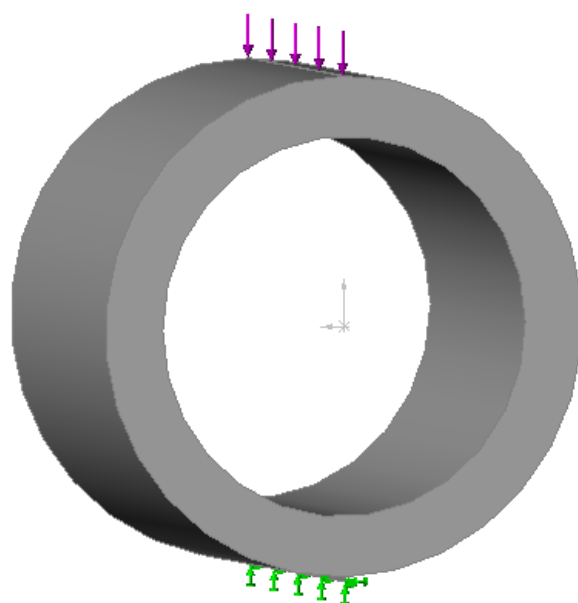


Figura 2.26 - Condições fronteira e carregamento do anel de carga .

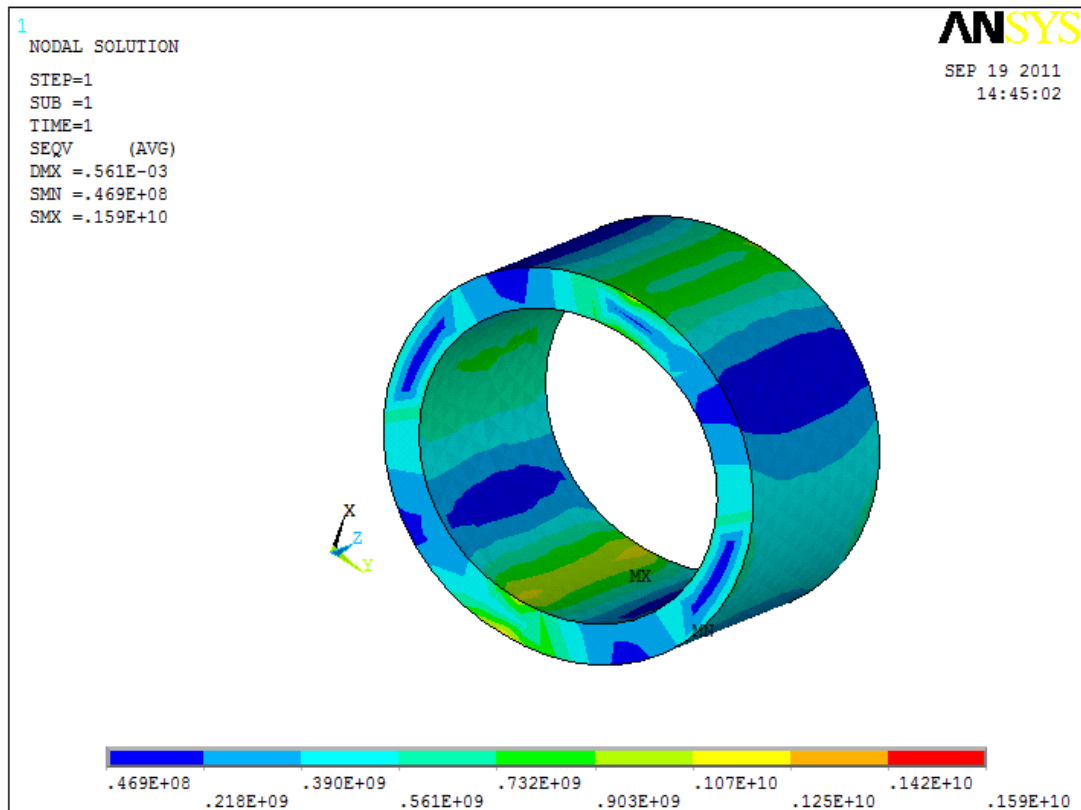


Figura 2.27- Anel de carga e tensões de Von Mises.

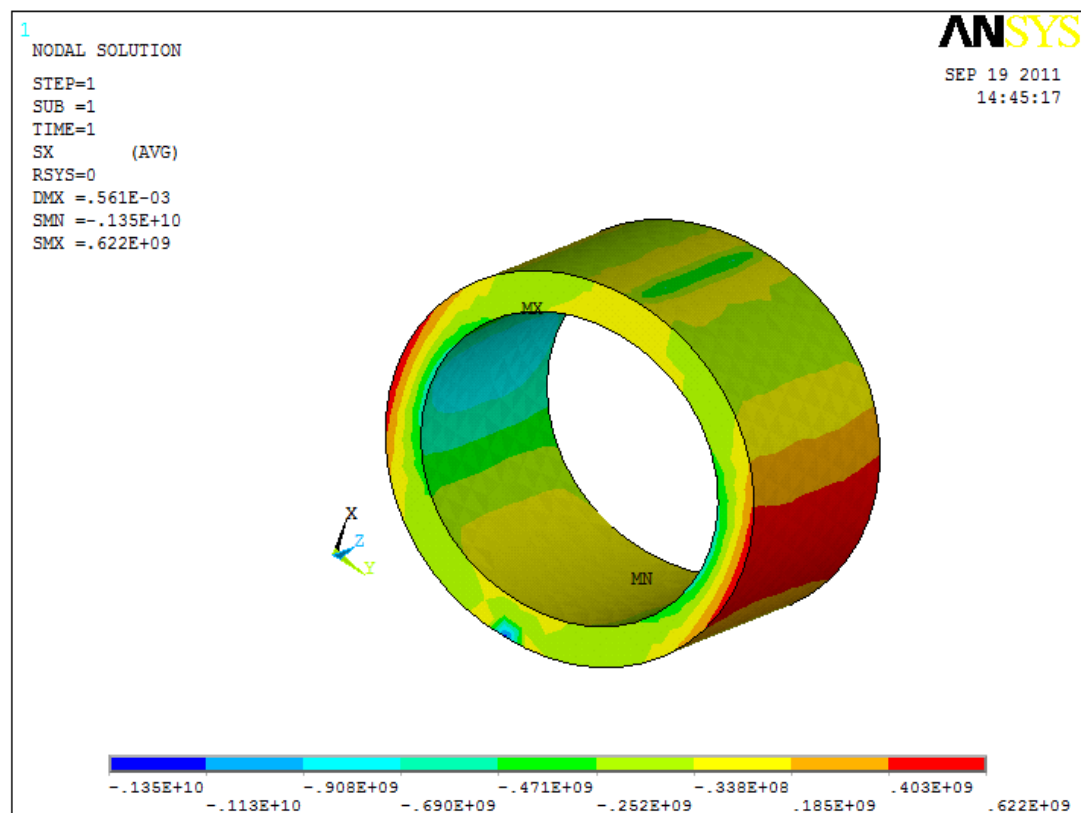


Figura 2.28 – Anel de carga e tensões normais (σ_{yy}) no plano perpendicular ao eixo vertical (eixo x da figura).

Dos resultados obtidos com a simulação realizada, figuras 2.27 e 2.28, podem tirar-se as seguintes conclusões:

- No plano de simetria horizontal do sensor, local onde serão colocados os extensómetros, ocorre o fenómeno de flexão, ou seja, nesta zona o sensor apresenta tensões de compressão e de tracção. Por isso é possível ligar os extensómetros em ponte completa.
- O anel apresenta tensões superiores à tensão de cedência do material, o que significa que o anel de carga encontra-se no domínio plástico.
- A área de contacto entre o sensor e os cabeçotes superior e inferior não é a ideal, ou seja, a área de contacto entre o sensor e os cabeçotes é muito estreita (figura 2.29), o que provoca tensões normais elevadas.

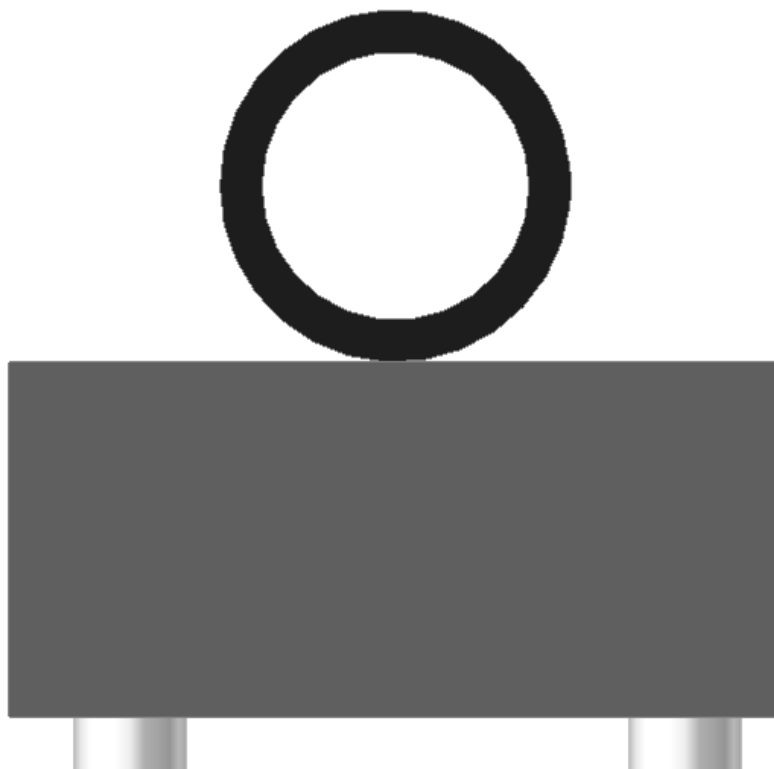


Figura 2.29 – Área de contacto entre o anel de carga e o cabeçote superior.

Verifica-se que o anel de carga não é a solução adequada para o sensor que se pretende construir, apesar de permitir montagem dos extensómetros em ponte completa de Wheatstone.

2.4 Sensor de Carga – Octaédrico V.1

Da combinação do anel de carga e do sensor paralelepipedico surge a ideia do sensor octaédrico, que está representado na figura 2.30 e no anexo 8. A forma deste sensor combina as características fundamentais de cada um dos sensores já estudados:

- O anel de carga, quando comprimido, apresenta o fenómeno de flexão, o que permite a ligação dos extensómetros em ponte completa de Wheatstone.
- As faces planas do sensor paralelepipedico permitem uma maior área de contacto entre o sensor e o cabeçote da base móvel da máquina.

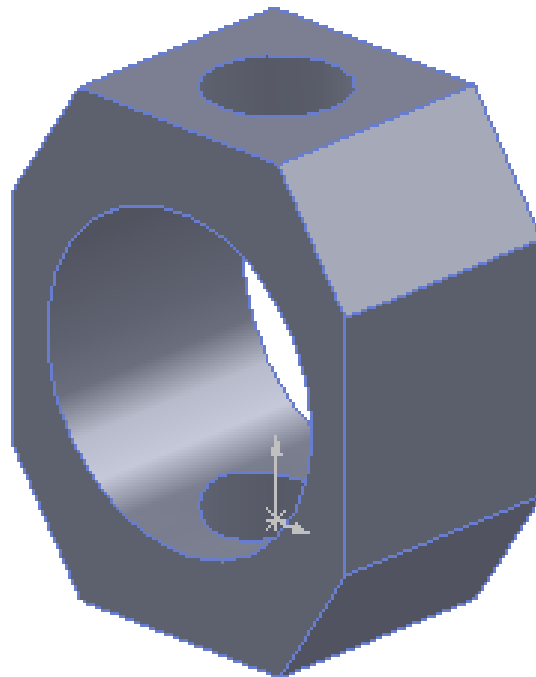


Figura 2.30 - Sensor octaédrico V.1.

No entanto o sensor octaédrico terá de respeitar os parâmetros de projecto tal como os outros sensores já analisados, o que significa, que o sensor deverá possuir uma largura máxima de 50 milímetros e uma espessura de 30 milímetros, figura 2.31.

Com base nos parâmetros de projecto, projectou-se um sensor octaédrico com as medidas ilustradas na figura 2.31.

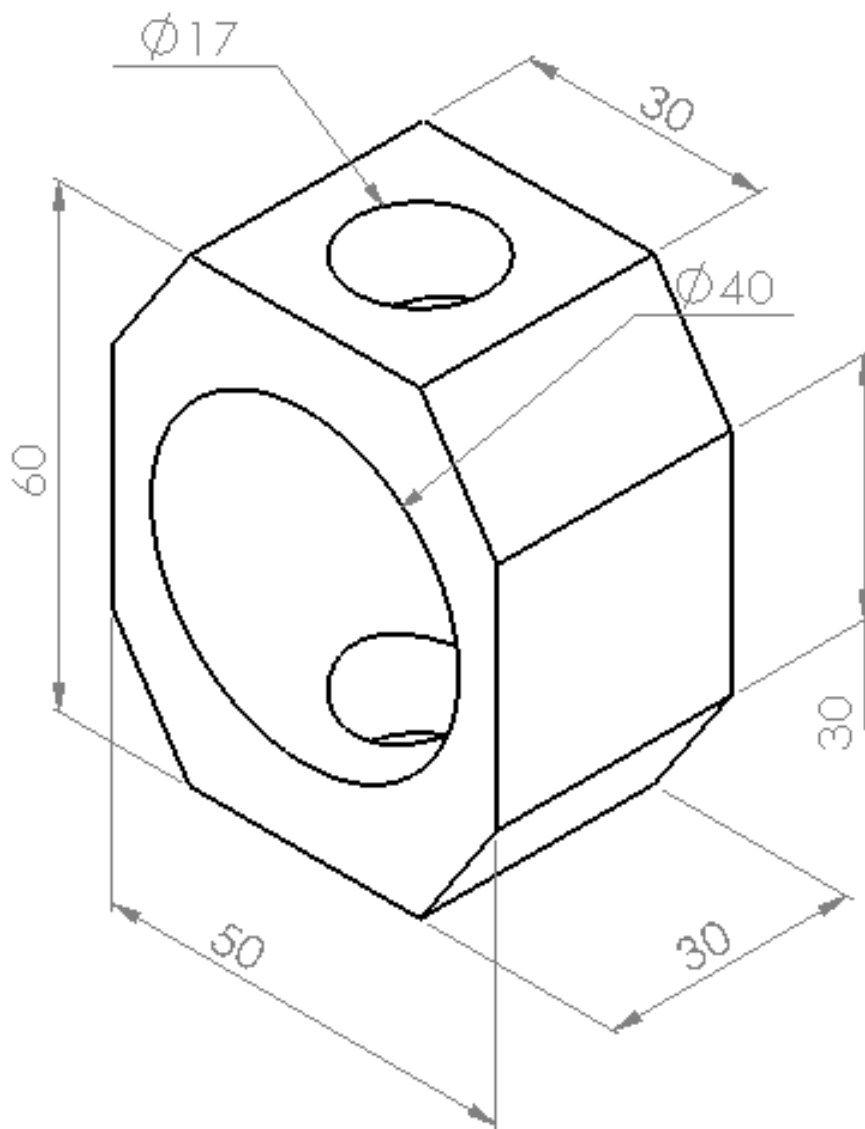


Figura 2.31 – Dimensão dos sensor octaédrico V.1 (mm).

A seguir realiza-se o estudo do sensor octaédrico, através do programa (em anexo 9 encontra-se as linhas de comando do programa) de elementos finitos ANSYS. O estudo do sensor é realizado através de uma análise linear, com uma força de 20 kN distribuída sobre a face superior do bloco e uma restrição de movimento na face inferior, simulando o contacto com os cabeçotes superior e inferior. Foram usados elementos de contacto entre o bloco e a face superior do sensor e entre o sensor e o plano rígido que representa a face do cabeçote.

A análise efectuada foi através de uma malha constituída por elementos triangulares e rectangulares (figura 2.32), com 13687 elementos e 22768 nós, para o modelo numérico do sensor octaédrico V.1.

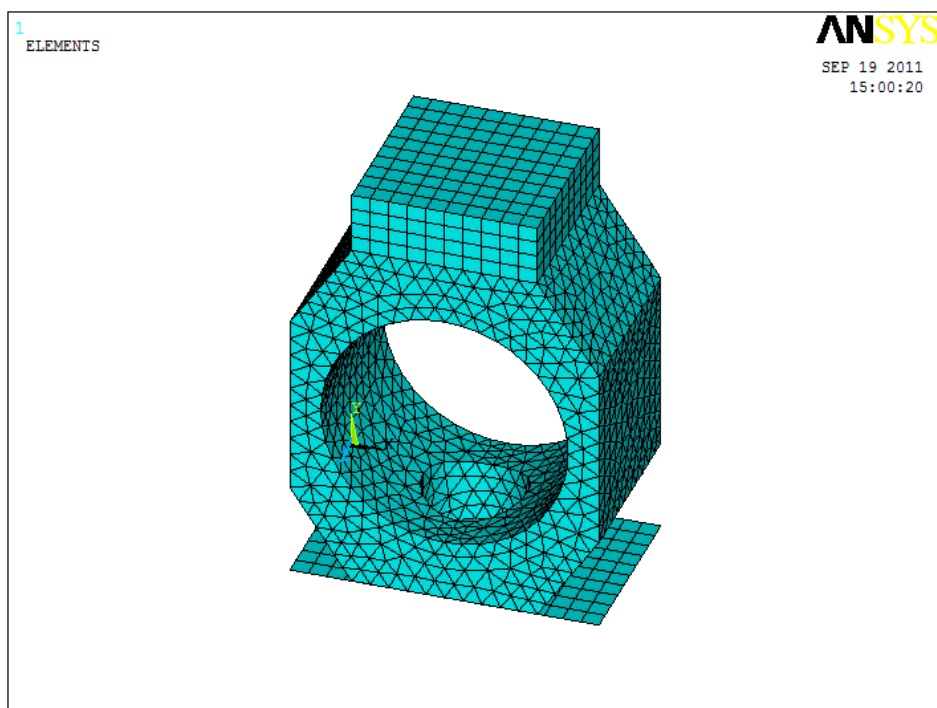


Figura 2.32 - Malha de elementos finitos do modelo numérico do sensor octaédrico V.1 (ANSYS).

As tensões de Von Mises obtidas, assim como as deformações estão representadas na Figura 2.33.

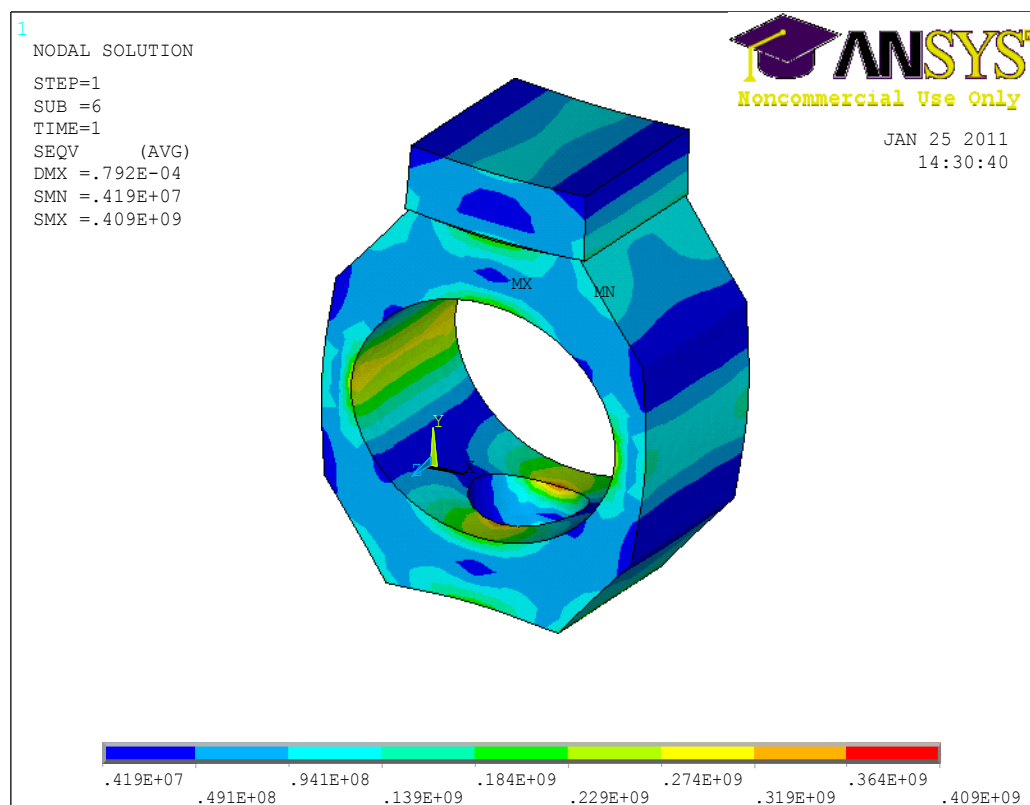


Figura 2.33 – Sensor octaédrico V.1 e Tensões de Von Mises.

Da análise efectuada em ANSYS (figura 2.33) podem obter-se as seguintes conclusões:

- O sensor encontra-se em regime plástico, pois a tensão máxima verificado no sensor é superior a tensão de cedência do material.
- A tensão máxima verifica-se na periferia do furo de menor diâmetro, o que poderá provocar o contacto entre o veio passante e o furo.

A combinação dos sensores, anel e paralelepípedo, traz vantagens, no entanto conserva um dos problemas que levaram à exclusão das soluções anteriormente mencionadas, que é a existência de tensões demasiado elevadas.

2.4 Sensor de Carga – Octaédrico V.2

Para eliminar as tensões elevadas junto ao furo de menor diâmetro, resolveu-se aumentar a altura do sensor, conforme ilustrado na figura 2.34, promovendo assim uma diminuição da tensão, contudo este incremento de material terá de ser simétrico, ou seja, igual na face superior e inferior do sensor, visível na figura 2.35 e anexo 10.

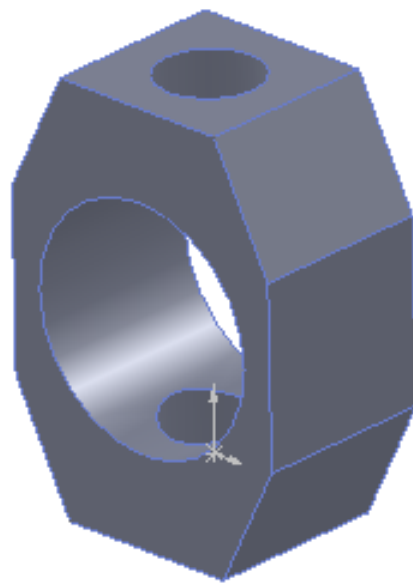


Figura 2.34 – Sensor octaédrico V.2.

Este incremento na altura teve como consequência um incremento na altura do sensor em 5 milímetros, passando de 10 para 15 milímetros (figura 2.35), permanecendo as dimensões da largura e dos furos iguais.

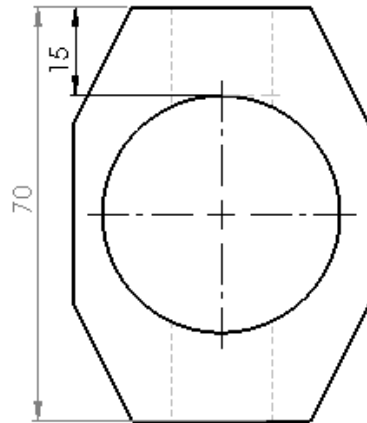


Figura 2.35 – Dimensões do sensor octaédrico V.2.

De seguida realiza-se o estudo do sensor octaédrico, através do programa em anexo 11 encontra-se as linhas de comando do programa) de elementos finitos, ANSYS. O estudo do sensor é realizado através de uma análise linear, com uma força de 20 kN aplicada na face superior do bloco e considerando uma restrição de movimento na face inferior do sensor octaédrico, para simular o contacto com os cabeçotes superior e inferior.

A análise efectuada foi através de uma malha constituída por elementos triangulares e rectangulares (figura 2.36), com 15927 elementos e 26158 nós, para o modelo numérico do sensor octaédrico V.2.

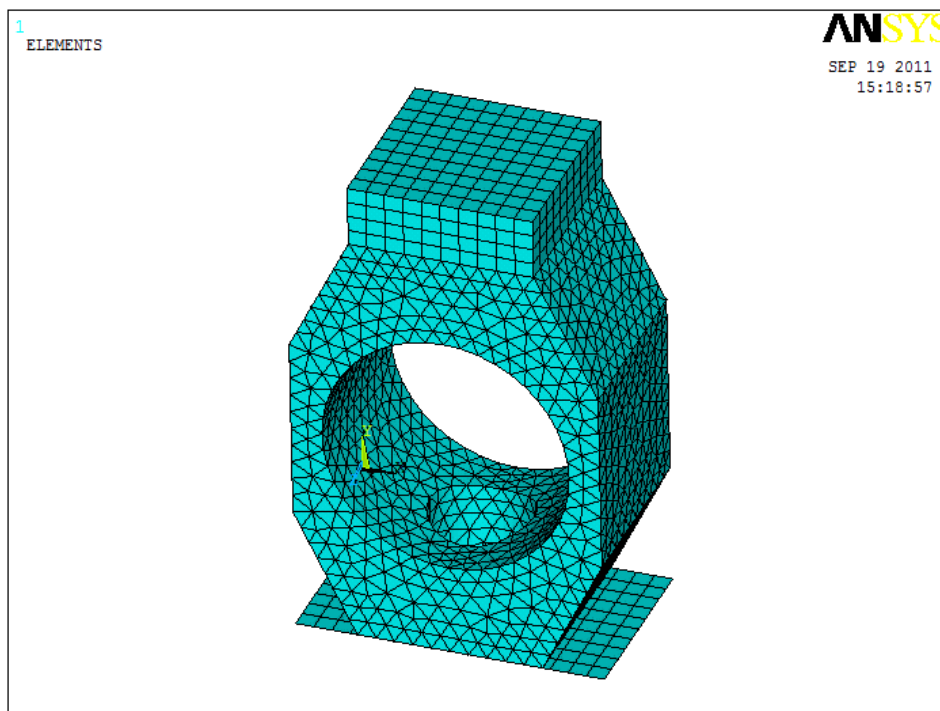


Figura 2.36 - Malha de elementos finitos do modelo numérico do sensor octaédrico V.2 (ANSYS).

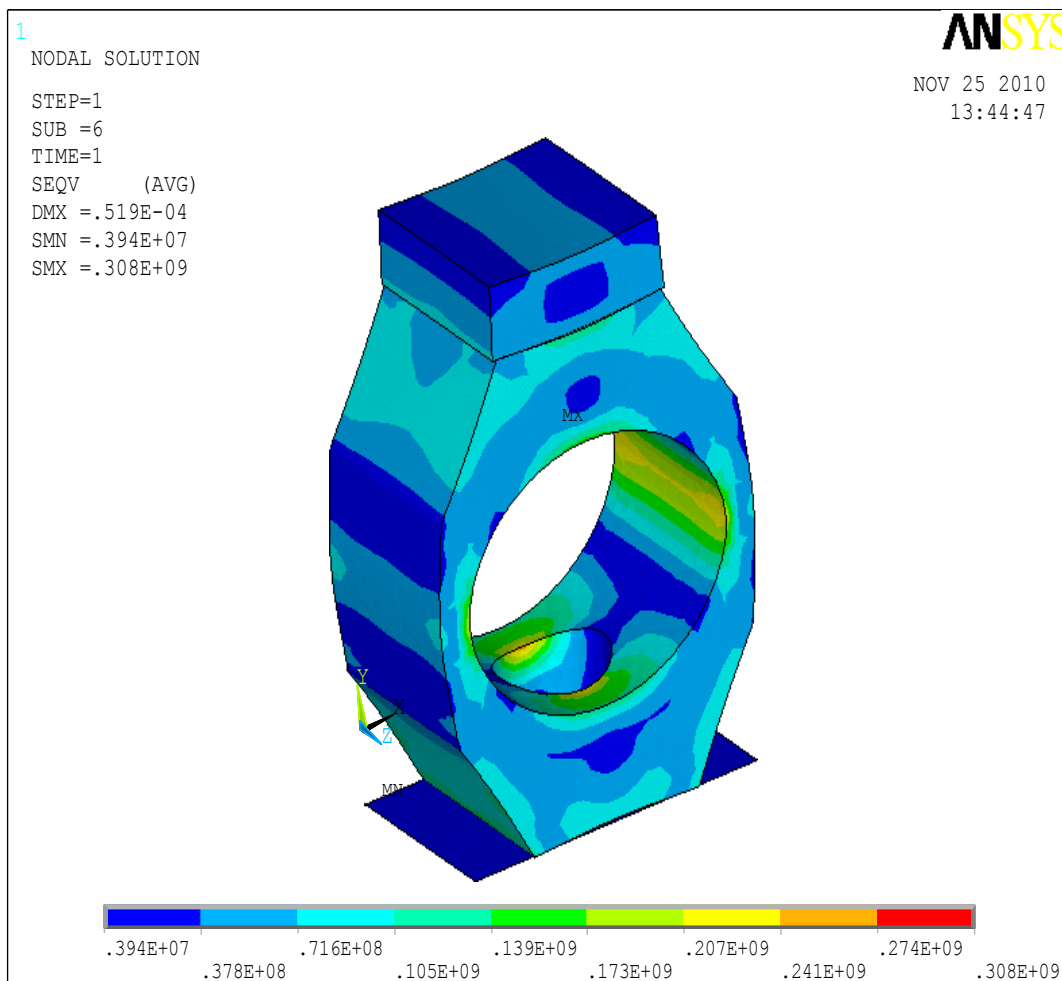


Figura 2.37- Sensor octaédrico V.2 e tensões de Von Mises.

A figura 2.37 evidencia as tensões de Von Mises e as deformações obtidas para o sensor octaédrico. Pode verificar-se que as tensões na periferia do furo são inferiores à tensão de cedência do sensor, ou seja, o sensor encontra-se em domínio elástico.

Depois de analisar as tensões junto ao furo de menor diâmetro, o passo seguinte é analisar as tensões que influenciam a localização dos extensómetros, para o tal é necessário analisar a figura 2.38 que representa as tensões segundo o eixo y do sensor octaédrico. Verifica-se, através da análise da figura 2.38, que o sensor apresenta tensões de sinal diferente, ou seja, o sensor apresenta fenómeno de flexão. Na figura 2.38 está representada a azul a zona onde ocorre compressão, tensão de sinal negativo, e a vermelho a zona onde ocorre tracção, tensão de sinal positivo, sendo nestas zonas de tensões de sinais diferente (plano horizontal de simetria) que se irão ser colocados os extensómetros, permitindo assim fazer a ligação em ponte completa de Wheatstone como se pretendia e será posteriormente explicado.

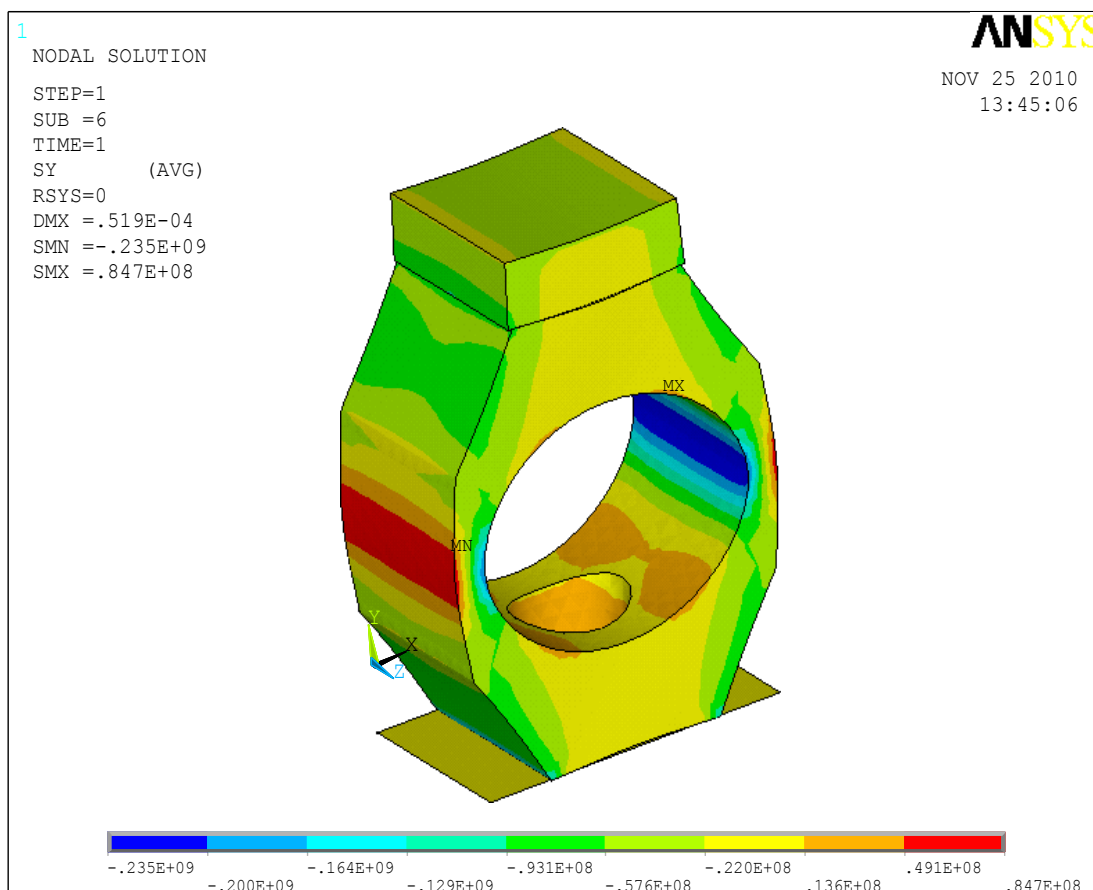


Figura 2.38 – Sensor octaédrico V.2 e tensões normais (σ_{yy}) no plano perpendicular ao eixo vertical (eixo y da figura).

Os estudos anteriores foram realizados com a intenção de utilizar um aço corrente, fácil de adquirir e de preferência já existente no laboratório. Contudo os aços correntes apresentam propriedades mecânicas inferiores ao desejado, o que significa que a tensão de cedência é cerca de 350 MPa.

Conclui-se que não era viável a utilização de um aço corrente na construção do sensor de carga uma vez que o factor de segurança iria ser igual ou inferior a um. Sendo assim prosseguiu-se a elaboração de um novo projecto do sensor de carga.

2.5 Sensor de Carga – Octaédrico V.3

O estudo do novo sensor de carga (figura 2.39 e desenho no anexo 12) que se segue foi limitado pelas dimensões do varão de aço adquirido. O varão de aço apresentava uma película de oxidação, esta foi retirada conforme descrito no capítulo 3, diminuindo o diâmetro do varão, impossibilitando a construção do sensor com as anteriores dimensões.

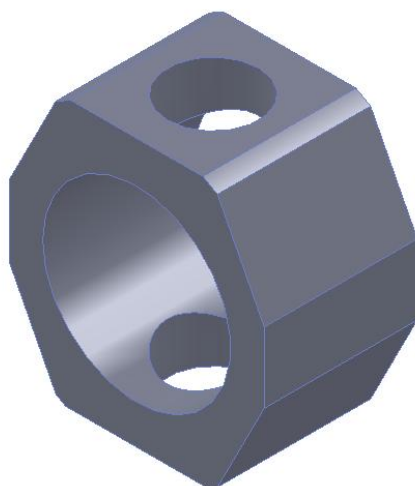


Figura 2.39 Sensor de carga octaédrico V.3.

O material adquirido apresenta propriedades mecânicas superiores ao anterior, concretamente a tensão de cedência (700 MPa), conforme a tabela no anexo 13, o que possibilita projectar um sensor de menores dimensões e um factor de segurança de dois.

O novo sensor apresenta a mesma forma octaédrica, contudo possui outras dimensões, visíveis na figura 2.40. Feitas as alterações, realizou-se a análise da nova versão do sensor de carga com o auxílio do programa de elementos finitos SolidWorks.

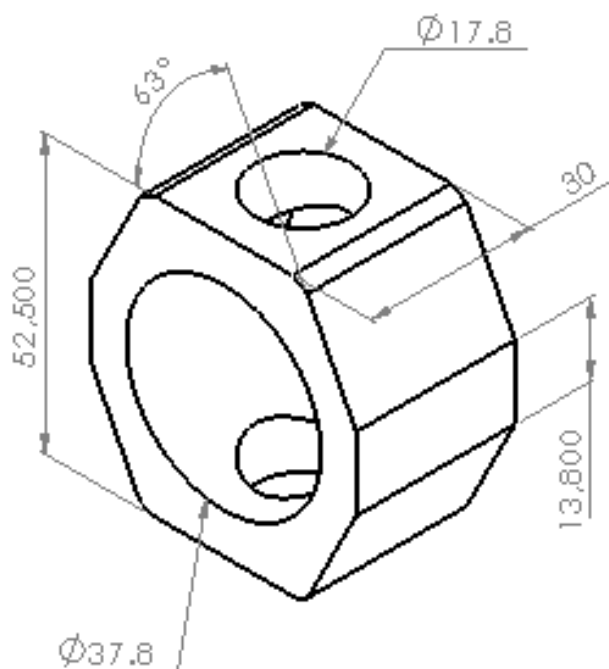


Figura 2.40 – Dimensões do sensor octaédrico V.3 (mm).

O estudo do sensor é realizado no SolidWorks, mas propriamente o Simulation, com uma força distribuída de 20 kN na face superior da placa e uma restrição de movimento na face inferior do sensor octaédrico, simulando o cabeçote superior e na face superior do sensor é usado elementos de contacto com a placa de elevada tensão de cedência. A malha de elementos finitos utilizada foi através do modo automático, com 52856 nós e 33255 elementos, visível na figura 2.41.

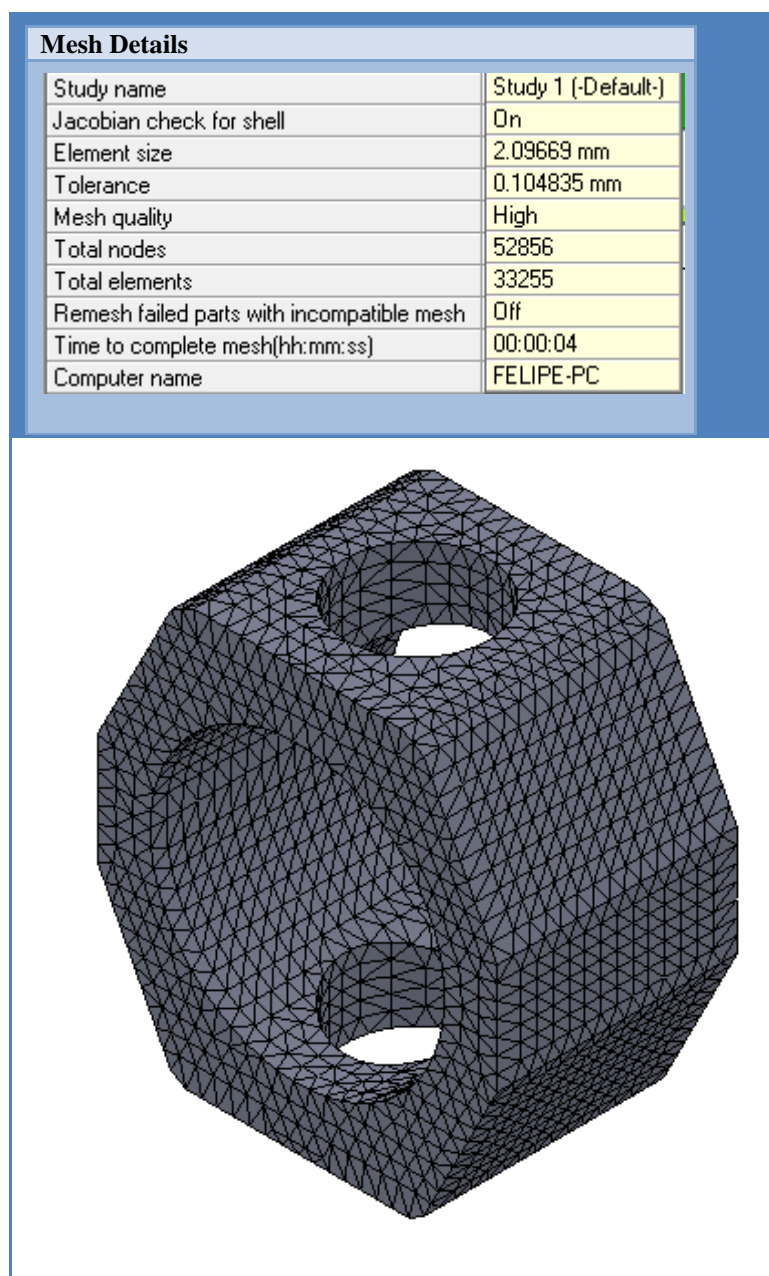


Figura 2.41 – Malha de elementos finitos do modelo numérico do sensor octaédrico V.3 (Simulation).

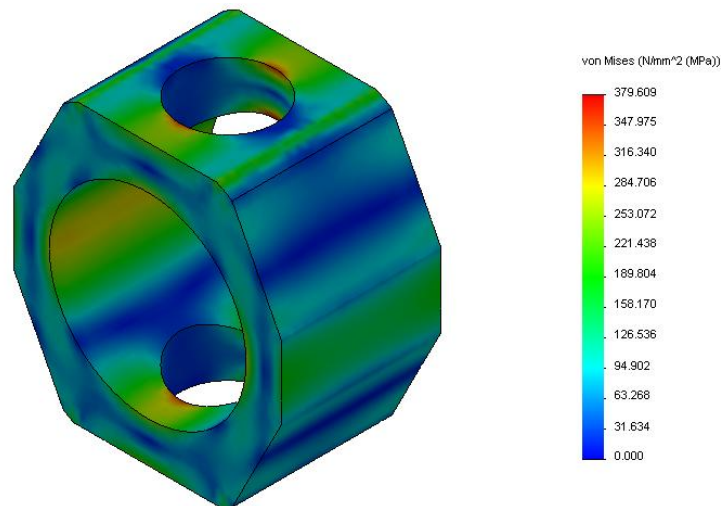


Figura 2.42 – Sensor de carga octaédrico V.3 e tensões de Von Mises.

Através da figura 2.42, que representa as tensões de Von Mises, podem-se verificar as seguintes conclusões:

- As tensões presentes no sensor de carga são inferiores ao valor da tensão de cedência do material, o que significa que o sensor se encontra no domínio elástico.
- Verifica-se a continuidade da tensão máxima junta ao furo de menor diâmetro.

Depois da análise do critério de Von Mises, segue-se o estudo das tensões normais no plano perpendicular ao eixo vertical (eixo y na figura), visível na figura 2.42, com o objectivo de verificar como se encontra a distribuição de tensões segundo esta direcção no local onde se pretende instalar os extensómetros.

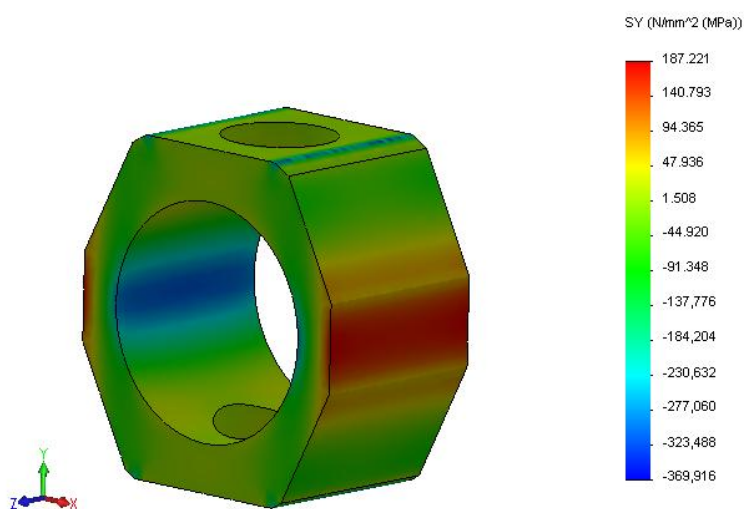


Figura 2.43 - Sensor octaédrico V.3 e tensões normais (σ_{yy}) no plano perpendicular ao eixo vertical (eixo y da figura).

Verifica-se, através da análise da figura 2.43, que o sensor apresenta tensões de sinal diferente, ou seja, o sensor apresenta o fenómeno de flexão. Na figura 2.43 está representada a azul a zona à compressão, tensão de sinal negativo, e a vermelho a zona à tracção, tensão de sinal positivo. Nesta zona serão colocados os extensómetros em ponte completa de Wheatstone .

Visto que o sensor de carga octaédrico V.3 respeita os requisitos do projecto, (ver desenho em anexo 12), encontra-se dimensionado o sensor de carga a construir.

2.6 Sensor de Deslocamento

Depois de uma pesquisa bibliográfica e considerando as restrições do projecto, resolveu-se projectar um sensor de deslocamento de pequenas dimensões, com uma complexidade reduzida, visto que será produzido no laboratório de mecânica estrutural do DEMI da Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL).

O sensor é composto por duas laminas metálicas de 80 milímetros, um suporte oco quadrado em alumínio de 20 milímetros e elementos de ligação, (conforme o desenho 14).

2.6.1 Sensor de Deslocamento

O estudo que se segue consiste numa análise da chapa à flexão, considerando uma abertura entre chapas de 40 milímetros.

Cálculo do segundo momento de área da secção da lâmina:

A flexão ocorre na chapa em torno do eixo x, pois $I_x < I_y$, conforme ilustrado na figura 2.44.

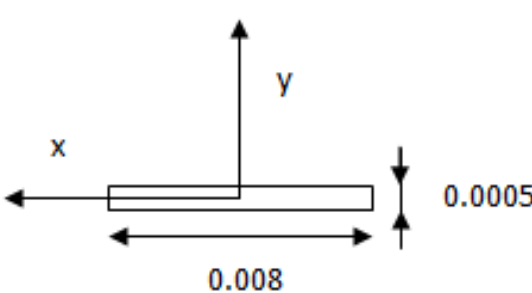
Secção transversal da viga	
	$\frac{0.0005 * (0.008)^3}{12}$ $I_x = \frac{0.008 * (0.0005)^3}{12}$ $I_x < I_y \rightarrow$ $8.3333 \times 10^{-14} < 2.1333 \times 10^{-11}$

Figura 2.44 – Momento de inércia das lâminas do sensor de deslocamento.

Cálculo da força

O cálculo da força nas lâminas do sensor de deslocamento, conforme a figura 2.45, é feito impondo um deslocamento de dez milímetros numa das pontas das lâminas, e considerando a outra ponta encastrada, de modo a não permitir nenhum movimento. Considerou-se que o deslocamento imposto é o limite máximo, para que o sensor de deslocamento não perca a linearidade entre o deslocamento e as extensões retiradas através dos extensómetros.

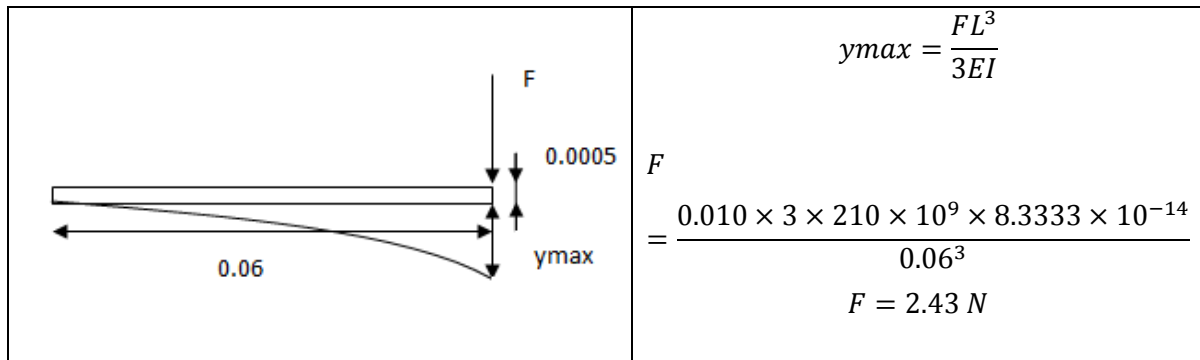


Figura 2.45 – Cálculo da força na lâmina do sensor de deslocamento.

$$y_{max} = \frac{FL^3}{3EI} \quad (2.6)$$

Utilizando a equação 2.6 obtêm-se uma força de 2.43 N, quando se aplica um deslocamento de dez milímetros na ponta da lâmina do sensor de deslocamento.

Cálculo do momento flector

O cálculo do momento flector é realizado com base na figura 2.46, com a força calculada anteriormente e a equação 2.7.

$$M = F \times L \quad (2.7)$$

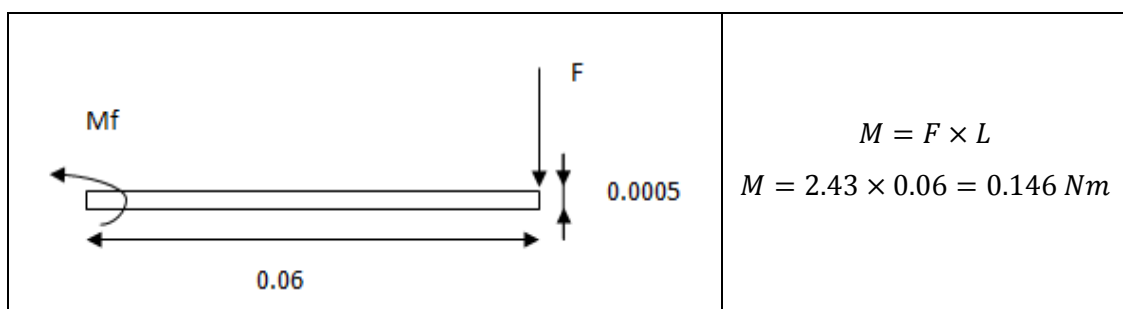


Figura 2.46 – Cálculo do momento flector.

Cálculo da tensão

O cálculo da tensão existente na lâmina do sensor de deslocamento é realizado através do cálculo dos momentos, o de inércia e o flector, e a equação 2.8.

$$\sigma = \frac{M \times t}{I \times 2} \quad (2.8)$$

$$\sigma = \frac{M \times t}{I \times 2} \leftrightarrow \sigma = \frac{0.146 \times 0.005}{8.3333 \times 10^{-14} \times 2} \rightarrow \sigma = 435 \text{ MPa}$$

A tensão máxima existente na lâmina do sensor de deslocamento, quando se aplica um deslocamento de dez milímetros numa das faces, é de 435 MPa. Sendo a tensão de cedência do aço a utilizar na construção deste sensor muito superior à tensão máxima verificada, encontra-se dimensionado o sensor de deslocamento, que é constituído por duas chapas com 80 milímetros de comprimento e 8 de largura, uma secção quadrada de alumínio de 20 milímetros e os respectivos elementos de ligação. O sensor de deslocamento será apresentado em pormenor no próximo capítulo.

Capítulo 3

Neste capítulo pretende-se dar a conhecer as ferramentas informáticas usadas nesta dissertação, bem como a programação, produção dos sensores, mecanismo de calibração e a colagem dos extensómetros.

3.1 Ferramentas informáticas

3.1.1 SolidWorks

O SolidWorks é um programa modelador de sólidos, bidimensionais ou tridimensionais, permite também a realização de projectos mecânicos e estruturais, bem como a análise estática, térmica e dinâmica. De fácil utilização, o SolidWorks permite ao utilizador executar tarefas essenciais em pouco tempo.

Os sensores criados foram modelados em 3D recorrendo a este programa. Para a análise de tensões devidas aos carregamentos a aplicar foi utilizado um módulo adicional de simulação estrutural, denominado Simulation. Neste módulo são definidos os apoios e os carregamentos, de forma a obter os valores de tensão nas direcção pretendidas, com particular ênfase nas zonas onde se previa instalar os extensómetros. Através deste programa foi possível prever as zonas dos sensores sujeitas às maiores tensões.

3.1.2 ANSYS

O ANSYS é um software pioneiro na aplicação de métodos de elementos finito. O programa está dividido em três ferramentas principais, pré-processador, solução e pos-processador. Tal como o SolidWorks, também permite a modelação bidimensional, tridimensional e a análise de estruturas estáticas e dinâmicas, análise de transferência de calor e entre outras.

Com o auxílio deste programa, foram modelados em 3D os sensores de carga, com o intuito de analisar as tensões devidas ao carregamento. Através do programa foi possível prever as zonas dos sensores sujeitas às maiores tensões e o local onde se irá instalar os extensómetros.

3.1.3 Labview

O objectivo principal da dissertação é desenvolver sensores para equipar a máquina de ensaios, mas contudo existe outro objectivo implícito. O segundo objectivo é desenvolver um programa em Labview capaz de fazer a aquisição e tratamento dos dados recolhidos a partir dos extensómetros instalados nos sensores a construir.

Para ler os dados dos extensómetros dos sensores é utilizada a placa NI SCXI-1314 incorporada num chassis NI SCXI-1000, ambos da National Instruments®. O software usado foi o Labview, possuindo várias vantagens tais como o tratamento de dados e a configuração do equipamento. Utiliza uma linguagem gráfica (programação por blocos) criada pela National Instruments®. A programação é feita de acordo com um modelo de fluxo de dados, permitindo que cada programa pode ser usado como sub-programa ou simplesmente ser executado separadamente.

3.2 Sensor de Carga – Octaédrico V.3

Antes de iniciar a explicação do processo construtivo do sensor de carga, torna-se necessário referir o material escolhido para a sua construção, material que, como é óbvio, tem de conseguir resistir aos carregamentos a suportar pelo sensor, previamente definidos no capítulo 2. Com este objectivo foi escolhido um aço G12 Red 60, que possui uma tensão de cedência de 700 MPa e um módulo de elasticidade de 210 GPa, proveniente da empresa F.Ramada, Aços e Indústrias, S.A, as restantes propriedades mecânicas indicadas no anexo 13.

Para construir o sensor foi adquirido à F. Ramada um cilindro de 60 milímetros de diâmetro e 400 milímetros de comprimento. Pretendia-se construir o sensor de forma que a maior dimensão, 52.5 milímetros, ficasse alinhada com o eixo do cilindro (ver figuras 2.34 e 2.35). Contudo, para facilitar a fixação do cilindro nas máquinas ferramentas usadas para o fabrico, optou-se por fazer coincidir a menor dimensão do sensor, 30 milímetros, com o eixo do cilindro. Isso obrigou a uma alteração do projecto, com o arredondamento das arestas como está representado na figura 2.39. A figura 3.1 mostra o sensor de carga depois de maquinado.



Figura 3.1 – Sensor de Carga V.3 depois de maquinado.

O sensor de carga foi produzido essencialmente através do uso de um torno convencional e um centro de torneamento CNC (controlo numérico computadorizado).

No torno mecânico foram realizadas operações utilizando ferramentas de:

- Corte de exteriores, ferramentas estas que permitiram realizar operações de:
 - I. *Desbaste*: o cilindro no seu estado inicial apresentava uma oxidação superficial, esta foi retirada, tendo passado o cilindro de um diâmetro de 60 para 59 milímetros.
 - II. *Sangramento*: esta operação consistiu, neste caso, em retirar um disco cilíndrico de 30 milímetros de largura do cilindro de material original, visível na figura 3.2.
- Corte de interiores (broca):
 - I. Através de três brocas de diferentes diâmetros foi feito o furo de maior diâmetro do sensor. A primeira broca, de diâmetro 5 milímetros, foi utilizada com o objectivo de realizar o furo longitudinal do sensor e as restantes brocas, de diâmetros 9 e 17 de diâmetro serviram para alargar o furo, tornando desta forma possível o acesso por parte das ferramentas de corte interiores.
 - II. Através de uma ferramenta de corte interior o furo longitudinal foi alargado para 37 milímetros.



Figura 3.2 – Sangramento do sensor de carga.

O processo seguinte de construção do sensor envolveu a utilização em simultâneo, do centro de torneamento e de uma prensa mecânica que possibilitou a translação do sensor em torno da ferramenta de corte, conforme se mostra na figura 3.3.

Com este conjunto foram maquinadas as oito faces e os dois furos passantes, só podendo ser realizada uma operação de cada vez, uma vez que foi necessário recolocar o sensor na prensa para cada uma das operações descritas.

Através do conjunto mencionado em cima, foram realizadas as oito faces do sensor:

- Corte de exteriores (roca), ferramentas estas que permitiram realizar operações de:
 - I. *Maquinação*: Com a prensa paralela ao plano do centro de torneamento, e consequentemente o sensor fixo através desta, foram realizadas quatro faces, duas faces paralelas e duas faces perpendiculares ao plano de trabalho do centro de torneamento.
 - II. *Maquinação*: Com um ângulo de 27° entre a prensa e o plano de trabalho do centro de torneamento, foram realizadas as últimas quatro faces do sensor, possuindo dois pares de faces paralelas entre si, visível na figura 3.3.

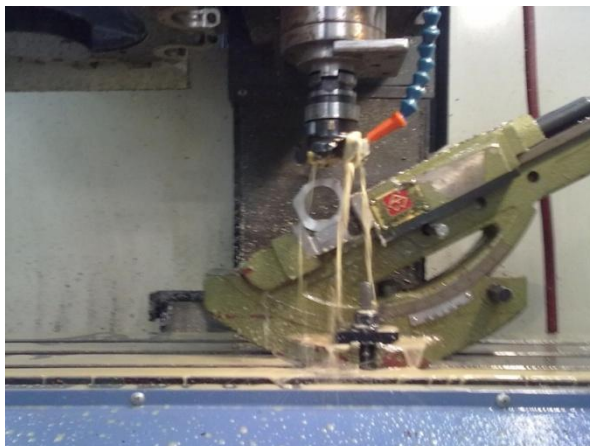


Figura 3.3 – Maquinação das faces do sensor de carga.

Os furos transversais ao sensor de carga, paralelos ao plano de trabalho do torno de CNC, foram necessárias as seguintes operações:

- Corte de interiores (broca):
 - I. Através de duas brocas de diferentes diâmetros foi feito o furo de menor diâmetro do sensor. A primeira broca, de diâmetro 4 milímetros, foi utilizada com o objectivo de realizar o furo longitudinal do sensor e a segunda broca, de diâmetro 9 milímetros, serviram para alargar o furo, tornando desta forma possível o acesso por parte das ferramentas de corte interiores.

- Corte de exteriores, ferramentas estas que permitiram realizar operações de:
- II. Através de uma ferramenta de corte interior, o furo de menor diâmetro foi alargado para 17 milímetros.

3.3 Sensor de Deslocamento

A construção do sensor de deslocamento, visível na figura 3.4, foi relativamente mais fácil de realizar, uma vez que não foram necessárias operações de maquinagem complicadas com as envolvidas na construção do sensor de carga. Este sensor é essencialmente constituído por duas lâminas metálicas, uma secção de um perfil quadrado em alumínio e vários elementos de ligação (parafusos e porcas).

As lâminas metálicas do sensor de deslocamento são provenientes de lâminas de corte de um serrote manual.

O processo de construção das lâminas do sensor de deslocamento resume-se à utilização de uma rectificadora e uma guilhotina. Através do auxílio da guilhotina, foi efectuado o corte de duas lâminas com 80 milímetros de comprimento.

De seguida, com a ajuda da rectificadora realizaram-se as seguintes operações:

- Na periferia da serra encontrava-se uma zona ondulada e os respectivos dentes da serra que foram necessários remover.
- Foi ainda necessária realizar uma operação de facejamento, com intuito de eliminar toda a tinta das lâminas.

Numa das extremidades das lâminas foi ainda necessário realizar um chanfro, tendo este sido realizado com o auxílio de uma lixa rotativa circular.

O suporte do sensor de deslocamento, com uma dimensão de 12 milímetros de profundidade, provém de uma secção quadrada de alumínio, e foi extraído através de um serrote.



Figura 3.4 – Sensor de deslocamento.

Posteriormente, foram realizados quatro furos, através de um engenho de furar, quer nas chapas quer na secção de perfil quadrado. Estes furos tinham como intuito permitir aparafusar as lâminas ao suporte quadrado, conforme mostra na figura 3.5. Com o propósito de permitir o correcto ajuste das lâminas, de modo a torná-las coincidentes com um plano vertical, foi necessário ovalizar os furos originais, utilizando para uma lima circular, pormenor este visível da figura 3.5.

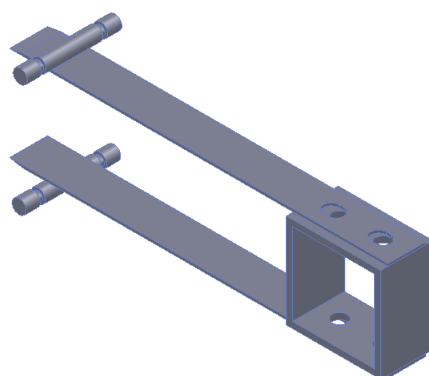


Figura 3.5 – DesenhosSensor de deslocamento.

Os cilindros que permitem fixar o sensor de deslocamento ao provete são provenientes de um varão de três milímetros de diâmetro. Através de um serrote, foram retirados do varão, dois cilindros de 20 milímetros de comprimento. Depois foram feitas duas estrias (figura 3.5) em cada um dos cilindros para assim permitir a utilização de uma mola ou de um elástico como elementos de fixação e ajuste do sensor aos provetes a ensaiar.

Os cilindros foram fixados às chapas através de uma cola de contacto para metal junto à extremidade das mesmas.

Acessório do sensor de deslocamento

Foi construído um acessório (figura 3.6 e desenho no anexo 15) para garantir que a distância entre lâminas se mantenha constante durante a fixação do sensor ao provete e a sua arrecadação. O acessório foi construindo a partir de um tubo de inox e de seguida, através de um serrote, foi efectuada duas ranhuras com um espaçamento de 20 milímetros entre si.



Figura 3.6 – Acessorio do sensor de deslocamento.

3.4 Mecanismo de calibração do sensor de deslocamento (provete falso)

Para calibrar o sensor de deslocamento foi necessário construir um mecanismo (figura 3.7), semelhante a um provete, este mecanismo simula o ensaio de tracção, na carga e na descarga.

A complexidade do mecanismo é reduzida, pois é constituído por elementos de fácil manuseamento, ou seja, dois ímanes circulares, dois tubos de PVC e um tubo de alumínio.

A construção do mecanismo foi realizada utilizando apenas um serrote e cola. Com o serrote, cortam-se três tubos, dois de PVC com o mesmo comprimento e um de alumínio de inferior comprimento e diâmetro. De seguida colaram-se os tubos de PVC aos ímanes, de forma a garantir a concentricidade.

Depois de realizado o processo de construção, segue-se a montagem do mecanismo, consistindo em colocar entre os dois tubos de PVC, o tubo de alumínio, garantindo-se desta forma a concentricidade entre os três tubos.

De seguida colocou-se o mecanismo de calibração entre as garras da prensa metálica, através do magnetismo dos ímanes, e fixou-se o sensor de deslocamento com o auxílio de dois elásticos, conforme a figura 3.7. A calibração do sensor de deslocamento consiste em rodar o manípulo da prensa, simulando o ensaio de tracção. Os valores de deslocamento entre lâminas são retirados através do micrómetro de exteriores.

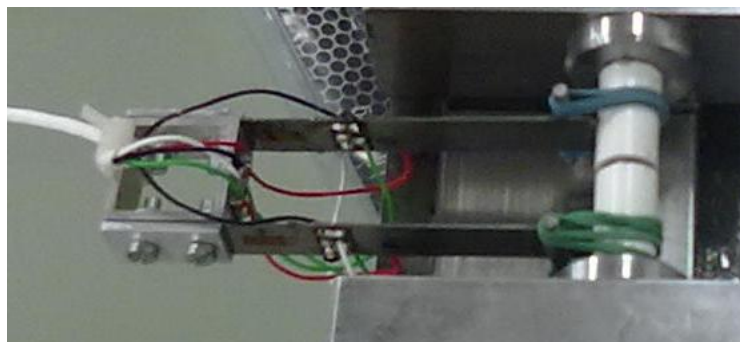


Figura 3.7 – Mecanismo de calibração do sensor de deslocamento.

3.5 Colagem dos extensómetros

Os extensómetros aplicados nos sensores de carga e deslocamento foram extensómetros uniaxiais, modelo EA-06-125BZ-350/LE (figura 3.8). Estes extensómetros possuem uma resistência de 350Ω , com um gauge factor de 2.115 e são fabricados pela Vishay.

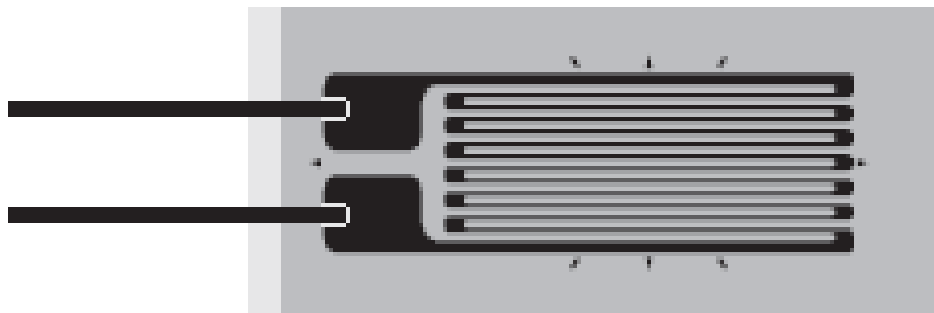


Figura 3.8 – Extensómetro EA-06-125BZ-350/LE.

A escolha dos extensómetros foi condicionada por aspectos de natureza logística e tecnológica:

- Logística, pois no momento não existiam em stock, no Laboratório de Mecânica Estrutural os extensómetros com as especificações pretendidas.
- Tecnológicos, porque se pretendiam instalar extensómetros com uma resistência de 350Ω , dado estes apresentarem uma menor de geração de calor (para a mesma tensão) quando comparados com os de 120Ω , reduzindo assim o aquecimento da grelha dos extensómetros. Também promovem a diminuição de ruído do sinal.

A análise experimental de tensões e extensões, realizada através de extensometria, apresenta uma possível fonte de erro resultante da deficiente colagem dos extensómetros. Uma das razões para a deficiente colagem dos extensómetros está associada à incorrecta preparação da superfície, onde os extensómetros serão colados.

O correcto funcionamento de um extensómetro requer que a sua base tenha exactamente a mesma deformação que a peça onde está colado, o que exige uma colagem perfeita. Para garantir essa colagem perfeita é conveniente proceder às operações de preparação de superfície e de colagem de uma forma metódica. Pela importância que a metodologia que foi seguida representa para o sucesso do fabrico do sensor, descrevem-se em seguida as várias fases do processo.

Metodologia da operação de preparação da superfície:

- O primeiro passo consiste na limpeza das zonas onde se pretende instalar os extensómetros. Esta limpeza é efectuada através de uma lixa de grão muito fino, de modo a eliminar a rugosidade superficial causada pelo tipo de maquinaria. As lixas usadas foram 220 e a 320 Grit Abrasive Paper (Vishay).

- O segundo passo resume-se à marcação dos eixos nos sensores, estes devem coincidir com os eixos nas fitas-cola, figura 3.9. Este processo de colagem de extensómetros de dimensões tão reduzidas, já tinha sido usado na construção de outros sensores de dimensões semelhantes no laboratório.
- O terceiro passo consiste em passar pelas zonas de colagem dos extensómetros e terminais, através de uma gaze, um desgordurante, o GC-6 IsoPropyl Alcohol.
- Após alguns minutos, aplica-se sobre a zona de colagem, uma gaze com condicionador, o Conditioner A da Vishay.
- O quinto passo consiste em passar um neutralizador na zona de colagem, através de uma outra gaze. O neutralizador usado foi o Neutralizer 5A da Vishay.

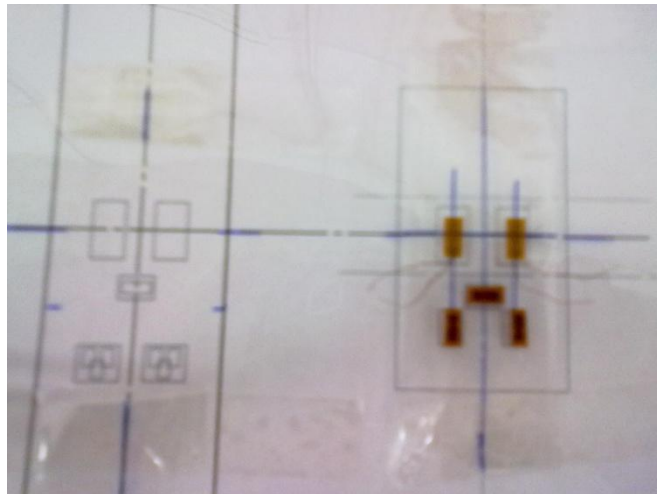


Figura 3.9 – Marcação dos eixos.

Depois de realizada a preparação da superfície, através da metodologia anteriormente descrita, segue-se o processo de colagem dos extensómetros e dos terminais:

- Previamente foi feito um esquema rigoroso da localização dos extensómetros e terminais, para cada um dos sensores. Esses esquemas foram impressos em folhas de papel e afixados a folhas de acetato, posteriormente é colocada fita-cola sobre as folhas e marcados pormenores importantes para a correcta localização destes no sensor, nomeadamente eixos (figura 3.9). A fita-cola empregue foi a PCT-2M, visível na figura 3.9.
- A fita-cola é retirada com o auxílio de pinças de ponta fina, virada do avesso e sobre a parte colante são colocados os extensómetros bem como os terminais.

- De seguida é ensaiada a colocação das fitas-cola nos sensores, de maneira a que os eixos marcados nas fitas e riscados nos sensores fiquem coincidentes, conforme se pretende mostrar na figura 3.10.
- Após este ensaio, é realizada, com todo o cuidado, a colagem das fitas-cola sobre o sensor. Com o apoio das pinças são levantadas as fitas-cola, tendo o cuidado de fazê-lo com um ângulo que não danifique os extensómetros, e é colocada através de um pincel a cola nos extensómetros e terminais. A cola escolhida para a colagem dos extensómetros foi a M-bond AE-15 da Vishay, figura 3.10.



Figura 3.10 – Colagem dos extensómetros no sensor de carga.

- O passo seguinte consistiu em garantir que os elementos colados não saiam do seu correcto lugar durante o processo de cura da cola, para garantir este procedimento foram utilizados pedaços de silicone e sobre este umas chapinhas, nas estas quais foi aplicada pressão com o auxílio de molas.
- A cola utilizada na colagem dos extensómetros obrigou a um processo de cura a 95°C durante uma hora, o que foi feito num forno.
- Após o processo de cura foram retiradas as fitas-cola o auxílio de pinças e realizaram-se as soldaduras dos fios dos extensómetros aos terminais. A figura 3.11 representa os sensores após colagem e soldadura.

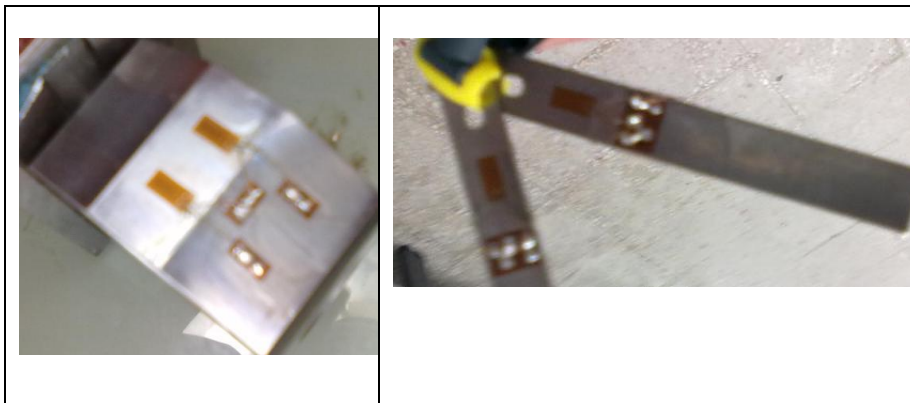


Figura 3.11 – Sensores de carga e deslocamento com os extensômetros colados, respectivamente.

- Após o processo de instalação dos extensômetros optou-se por aplicar uma camada de verniz protector, o M-bond 43B, protegendo-os assim de ambientes mais agressivos e conferindo uma maior rigidez aos fios dos extensômetros.
- O passo seguinte consiste em ligar, através de fios, os extensômetros em ponte completa. Nos anexos 16 e 17, encontram-se os esquemas de ligação dos extensômetros dos sensores de carga e de deslocamento, respectivamente.
- Finalmente, usou-se uma fita-cola no sensor de carga, para prender firmemente os cabos, já no caso do sensor de deslocamento, usou-se uma braçadeira de plástico, visível na figura 3.12.

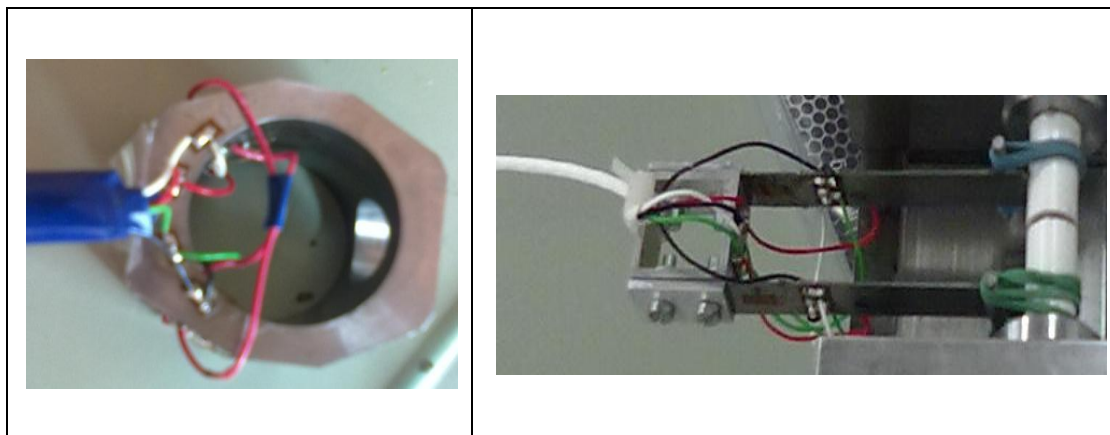


Figura 3.12 – Sensor de carga e de deslocamento, respectivamente.

3.6 Programa em Labview

A programação para a leitura dos dados dos extensómetros é efectuada em ambiente Labview. Baseada num modelo de fluxo de dados, que permite a aquisição de dados e a sua manipulação, encontram-se nos anexos 18 e 19, o diagrama e o painel frontal do programa realizado em Labview.

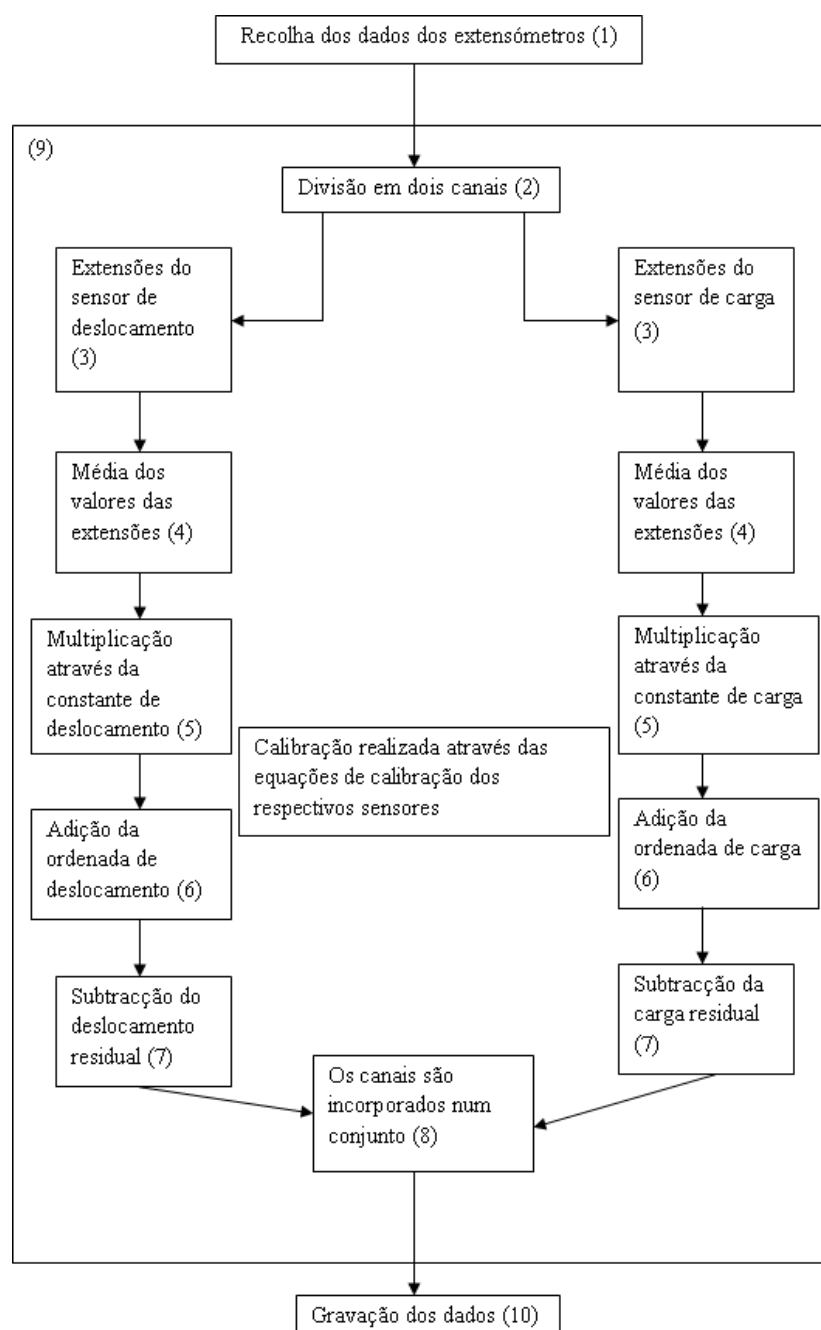


Figura 3.13 – Esquema e etapas do programa em Labview.

Com a intenção de obter e controlar os dados dos extensómetros foram desenvolvidos dois programas, um com o propósito de calibrar os sensores e o outro para efectuar os ensaios de tracção.

A diferença entre os programas desenvolvidos é mínima. Essa diferença consiste na existência de uma opção que cessa o programa, quando efectuado 240 ciclos, de modo a garantir o mesmo número de interacções entre os passos da calibração.

O programa de aquisição de dados dos extensómetros inicia-se segundo o esquema da figura 3.13, com a recolha de dados dos extensómetros, abaixo lista-se a sequência de funções:

1. A recolha dos dados do extensómetros consiste em cinco passos, visível na figura 3.14:
 - O primeiro passo baseia-se na procura da informação dos nomes dos canais a ler, ou seja, um canal para o sensor de carga e outro para o sensor de deslocamento.
 - De seguida é criado um canal virtual para cada uma das duas tarefas.
 - O terceiro consiste em definir o número de amostras e a frequência de amostragem a adquirir pelo programa para cada canal definido.
 - O passo seguinte dá o início à leitura dos dados em cada canal, neste caso as extensões dos extensómetros.
 - O quinto passo resume-se em ler a tarefa do canal virtual e transforma num canal com a especificação pretendida.

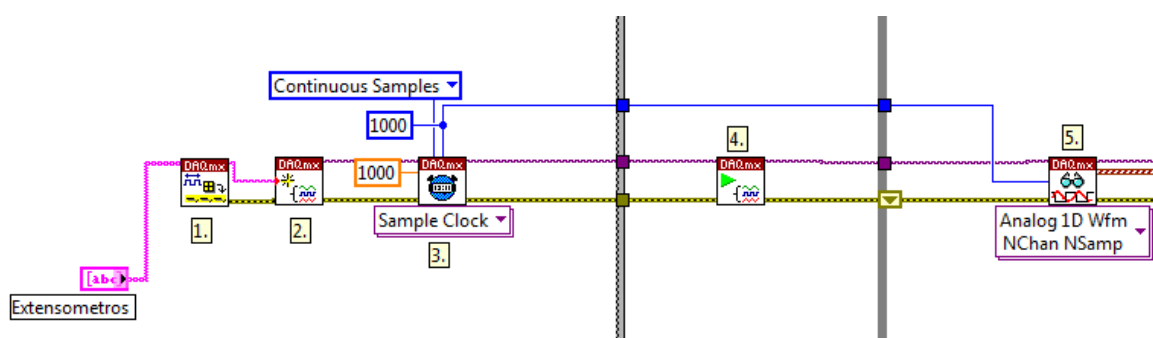


Figura 3.14 – Etapa 1 do programa em Labview.

2. Posteriormente é realizada a separação dos dados recolhidos, uma vez que se pretende conseguir tratar independentemente a informação relativa ao sensor de carga e ao sensor de deslocamento, esse procedimento é feito como se mostra na figura 3.15. No quarto passo é realizada a média das mil amostras por segundo, para cada um dos canais.

4. Neste passo (figura 3.17) é criada uma matriz com a informação dos dados recolhidos pelos dois sensores, que poderá ser ou não guardada, consoante isso seja ou não definido pelo utilizador. Pretende-se também demonstrar a evolução temporal dos dados adquiridos, realizada através do uso de dois gráficos, um para o sensor de carga e outro para o sensor de deslocamento e após a recolha dos dados, durante o intervalo de aquisição, efectuar um gráfico, em que as ordenadas são os dados do sensor de deslocamento e as abcissas são as do sensor de carga.

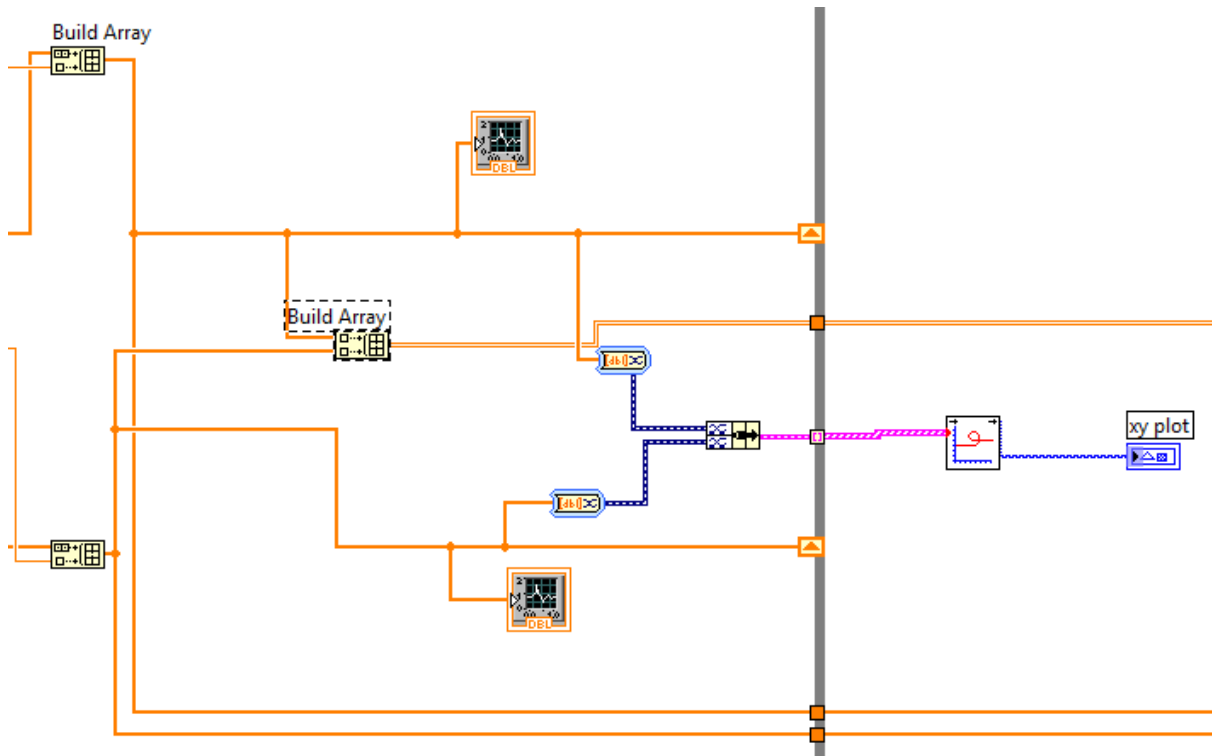


Figura 3.17 – Etapa 8 do programa em Labview.

5. As etapas de 2-8 do esquema do programa em Labview são realizadas num ciclo a cada quinhentos milissegundos (etapa 9) ou terminadas através do botão *stop* do painel frontal (figura 3.18). Neste espaço de tempo é executada a média de mil amostras e após o final ciclo é efectuada a limpeza dos dados.



Figura 3.18– Botão stop do painel frontal do programa em Labview.

6. Neste passo, o utilizador pode optar por gravar os dados dos extensómetros (figura 3.19) pressionado o botão no painel frontal (figura 3.20).

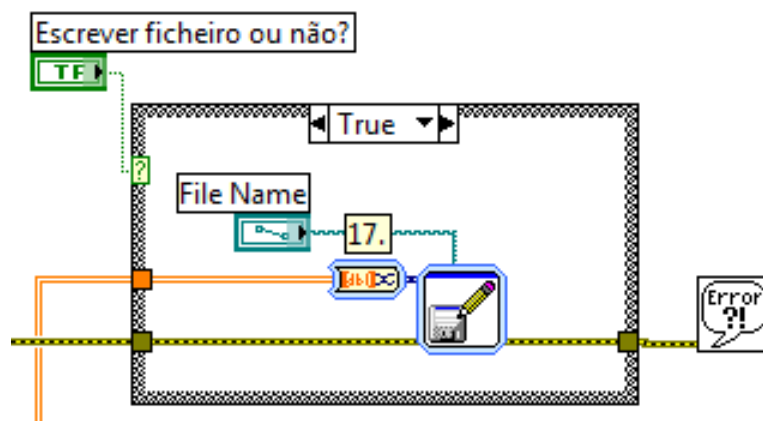


Figura 3.19– Etapa 10 do programa em Labview.

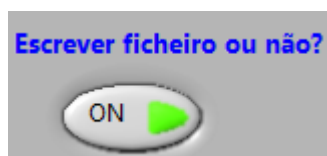


Figura 3.20– Botão de escrita de ficheiro do painel frontal do programa Labview.

Capítulo 4

Antes de utilizar os sensores para recolha de dados é fundamental verificar o seu correcto funcionamento e efectuar a calibração estática dos mesmos, durante este processo são despistados eventuais problemas com os sensores, resultantes uma incorrecta instalação dos extensómetros.

4.1 Sensor de deslocamento

O mecanismo utilizado para tornar possível a calibração do sensor de deslocamento é constituído por uma prensa de precisão, um falso provete (cap.3) e um micrómetro. A montagem do mecanismo consiste em colocar entre as “garras” da prensa metálica, o falso provete, uma das garras vai sendo deslocada, e com o auxílio de um micrómetro são retirados os valores da abertura entre as lâminas do sensor, esta montagem pode ser observada na figura 4.1.



Figura 4.1 – Mecanismo de calibração.

Para calibrar o sensor de deslocamento foi necessário realizar dois ensaios, um em que as lâminas do sensor partiam da posição inicial ou seja sem estarem sujeitas a qualquer flexão, e iam sendo afastadas (chamado de ensaio de carga) e outro em que partindo da última posição de afastamento entre lâminas do sensor, registada no primeiro ensaio, se realiza o teste no sentido contrário ao primeiro (chamado ensaio de descarga). Deste modo foi possível averiguar o comportamento do sensor em ambos os ensaios. O ensaio dito de descarga é realizado imediatamente a seguir ao ensaio de carga, o que significa que quando se obtém o valor máximo de deslocamento, prossegue-se ao ensaio de descarga.

Durante esses ensaios são retirados valores de extensão e de deslocamento e posteriormente é feito um gráfico com os mesmos.

Foram realizadas duas tentativas de calibração para o sensor de deslocamento. A primeira tentativa foi efectuada usando elásticos “normais” para fixar o sensor ao falso provete, o que provou o escorregamento das lâminas. Para evitar o escorregamento das lâminas foi efectuada duas ranhuras no falso provete. A segunda tentativa foi efectuada com molas, evitando assim o escorregamento das lâminas do sensor e uma melhor fixação ao falso provete.

4.1.1 Ensaio de carga

O ensaio de carga a realizar, teoricamente simples, consiste em rodar o manípulo da prensa no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio simulando desta forma um ensaio de tracção do provete, para cada situação de afastamento das lâminas foram registados os valores das extensões.

Durante o ensaio de carga do provete falso foram retirados dez valores de extensão e de deslocamento, onde o valor de extensão é calculado fazendo a média de duzentas e quarenta amostras, conforme a tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Ensaio de carga/ calibração do sensor de deslocamento.

Nº de pontos	Deslocamento entre as lâminas do sensor (mm)	Valores médios das extensões ($\mu\epsilon$)
1	22,24	-6,6762E-05
2	24,3	0,00014441
3	24,91	0,00021442
4	25,89	0,0003039
5	27,09	0,00042112
6	27,85	0,00050019
7	28,71	0,0005775
8	30,04	0,00070676
9	34,14	0,00126672
10	35,89	0,00144167

De seguida, é construída uma curva de calibração baseada na interpolação dos dados retirados experimentalmente, verificando a linearidade dos pontos. Assim sendo passou-se a ter uma relação entre o deslocamento das lâminas do sensor de deslocamento e a extensão, visível na figura 4.2.

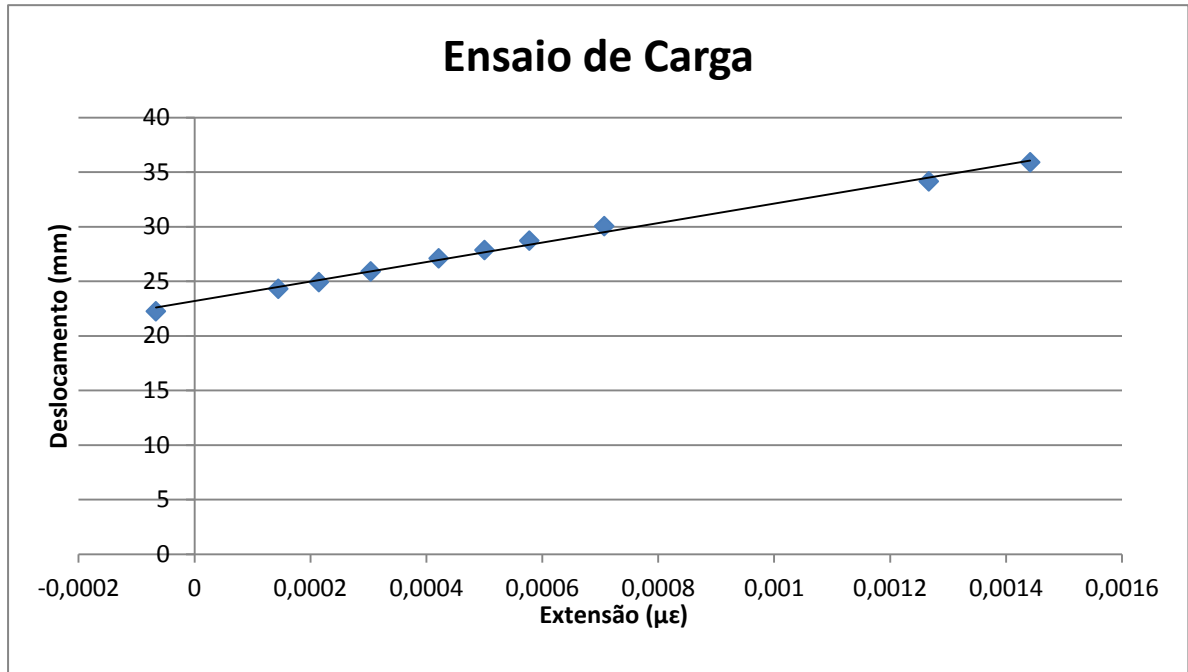


Figura 4.2 – Curva de calibração do ensaio de carga do sensor de deslocamento.

Com a interpolação linear dos pontos experimentais obtidos, é fácil escrever a equação 4.1 que permite converter os valores de extensão em deslocamento.

$$deslocamento.provete.carga = 8935.9 \times extensão + 23.182 \quad (4.1)$$

$$R^2 = 99,5\% \quad (4.2)$$

É importante realçar que o coeficiente de determinação (R^2), equação 4.2, está bastante próximo dos cem por cento, o que significa um bom funcionamento do sensor de deslocamento, do método de calibração e de uma ótima curva de calibração.

4.1.2 Ensaio de descarga

Ao contrário do ensaio de carga, o ensaio de descarga parte de um deslocamento, entre lâminas, máximo que vai sendo posteriormente reduzido, ficando no fim o sensor o mais próximo possível da posição indeformada. Este ensaio foi realizado após o ensaio de carga e em rodar os manípulos da prensa no sentido dos ponteiros do relógio, este movimento corresponde à descarga de tensão no provete.

No ensaio de descarga foram retirados onze pares de valores de extensão e de deslocamento, como ilustrado na tabela 4.2, a metodologia de análise é igual ao ensaio de carga.

Tabela 4.2 – Ensaio de descarga/ calibração do sensor de deslocamento.

Nº de pontos	Deslocamento entre as lâminas do sensor (mm)	Valores médios das extensões ($\mu\epsilon$)
1	22,03	-9,726E-05
2	23,21	9,3009E-06
3	24,7	0,00015396
4	26,17	0,00030097
5	28,01	0,00047408
6	29,06	0,00056805
7	31,2	0,00077741
8	32,79	0,00094418
9	34,05	0,00106309
10	34,77	0,00113714
11	35,83	0,00125575

Sendo assim, prosseguiu-se com a realização de uma nova curva de calibração, figura 4.3, e com a análise da equação obtida através da interpolação linear dos dados experimentais, equações 4.3 e 4.4.

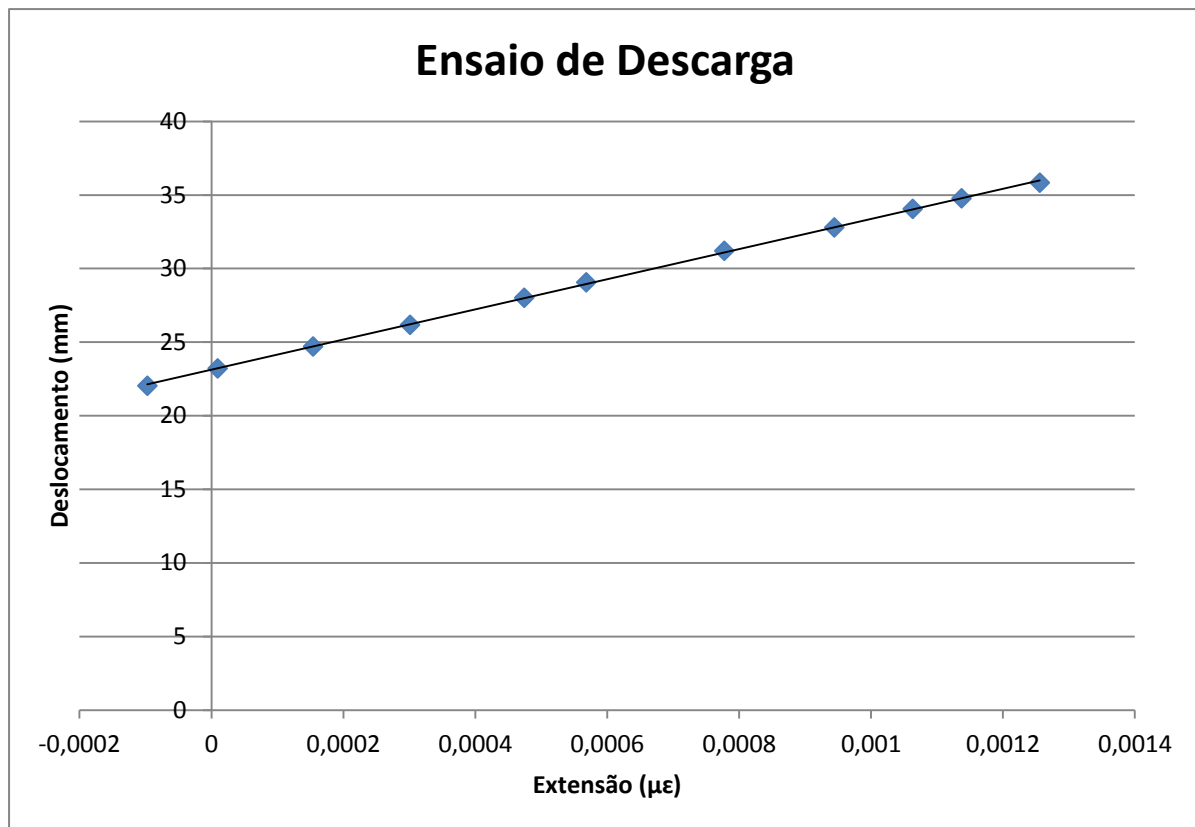


Figura 4.3 – Curva de calibração do ensaio de descarga do sensor de deslocamento.

$$deslocamento.provete.descarga = 10247 \times extensão + 23.121 \quad (4.3)$$

$$R^2 = 99,97\% \quad (4.4)$$

Tal como o ensaio de carga, o ensaio de descarga apresenta um coeficiente de determinação (R^2) bastante próximo dos cem por cento, como demonstrado pela equação 4.4.

O coeficiente de determinação é uma medida de qualidade do modelo econométrico, que permite estimar correctamente os valores da variável de resposta (ex. deslocamento.provete.descaga) e seleccionar a melhor curva de calibração.

Conforme a definição do coeficiente de determinação, quanto maior for o coeficiente, menor é o erro da curva de calibração. Por exemplo, a curva de calibração anterior apresenta o coeficiente de igual a 99.97%, que significa que 99.97% da variância da resposta (deslocamento.provete.descaga) é explicada pela variância da variável (extensão).

Para averiguar o comportamento do sensor de deslocamento na carga e descarga, foi necessário verificar se as curvas de calibração são coincidentes, para o tal foi realizado o gráfico da figura 4.4.

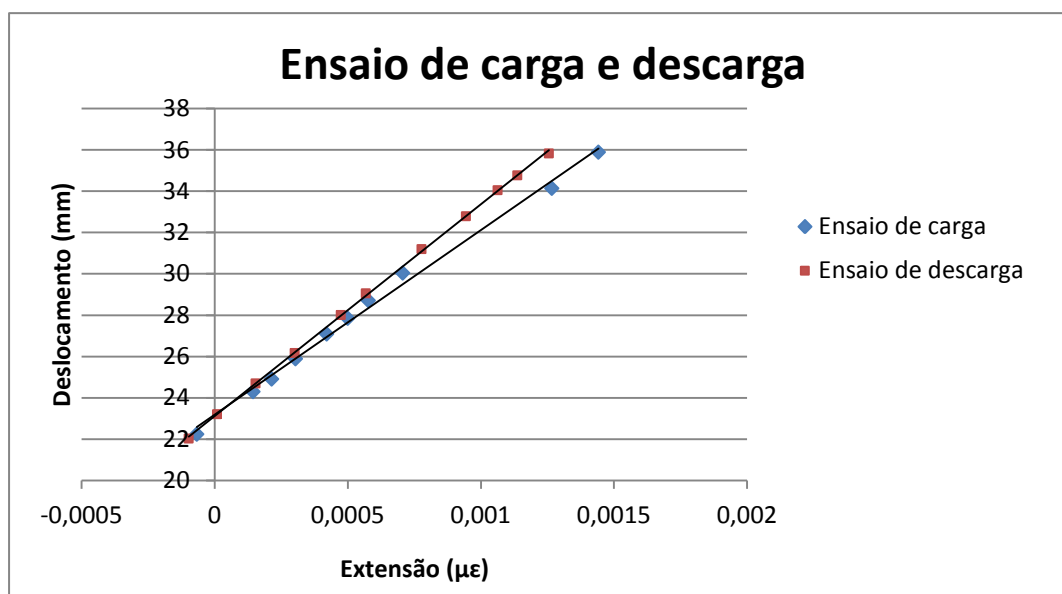


Figura 4.4 –Curvas de calibração do sensor de deslocamento.

Através da análise da figura 4.4, conclui-se que as curvas de calibração não são coincidentes, devido à existência de folgas no sistema usado no processo de calibração do sensor durante os ensaios de carga e descarga.

Visto que as curvas de calibração não são coincidentes, optou-se por escolher a curva que apresenta o maior valor de coeficiente de determinação, ou seja, a curva de calibração do ensaio de descarga.

As curvas de calibração do sensor de deslocamento foram construídas a partir de um deslocamento inicial (distância entre lâminas), o que significa que o sensor só mede valores a partir deste (20 mm). Para garantir esse deslocamento durante a fixação do sensor ao provete, foi construído um acessório (figura 3.6) a partir de um tubo com duas ranhuras com um espaçamento de 20 milímetros entre si, com o objectivo de colocar as lâminas do sensor nas ranhuras, visível na figura 4.5.

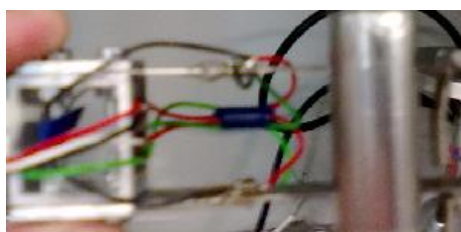


Figura 4.5 – Acessório montado no sensor de deslocamento.

4.2 Sensor de Carga

Tal como o sensor de deslocamento, o sensor de carga também foi calibrado, para tal foi utilizada a máquina de ensaios de tracção e de compressão, ilustrada na figura 2.1.

A calibração foi efectuada colocando o sensor no local onde são realizados os ensaios de compressão na máquina de ensaios, com a utilização de dois blocos de aço, para evitar potenciais riscos no sensor, colocados na face superior e inferior do sensor.

A metodologia empregue para calibrar o sensor de carga é igual à usada na calibração do sensor de deslocamento, ou seja, também são realizados dois ensaios, um de carga e outro imediatamente a seguir de descarga, com intuito de determinar a curva de calibração deste sensor.

Devido à dificuldade de conciliar a leitura da escala do manómetro com a sensibilidade do sensor, por outras palavras, o sensor de carga não é sensível à força da menor divisão do manómetro. Por isso escolheu-se uma força mínima de 2500 N para calibrar o sensor de carga e uma força máxima de 20 kN, esta ultima é imposta pelos requisitos do projecto.

4.2.1 Ensaio de carga

Com o sensor de carga devidamente colocado no local dos ensaios de compressão (conforme o desenho da figura 4.6), é realizado o ensaio de carga, que consiste em rodar o manípulo no sentido dos ponteiros do relógio (figura 4.7).

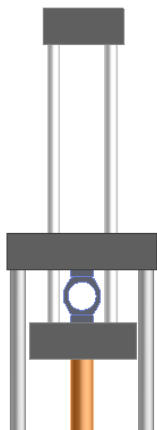


Figura 4.6 – Local onde foi realizado os ensaios de calibração do sensor de carga.

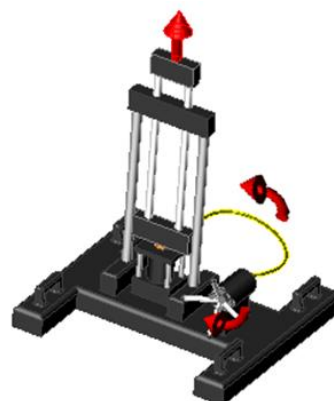


Figura 4.7 – Movimento/ensaio de carga de calibração do sensor de carga.

Durante o ensaio de carga do sensor foram retirados oito valores de extensão e de força, sendo os valores de força espaçados de 2500N, conforme a tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Ensaio de carga/calibração sensor de carga.

Nº de pontos	Carga aplicada (N)	Valores médios das extensões ($\mu\epsilon$)
1	2500	0,00011754
2	5000	-4,605E-05
3	7500	-0,0001998
4	10000	-0,0003539
5	12500	-0,0005092
6	15000	-0,0006613
7	17500	-0,000815
8	20000	-0,0009687

Após da recolha de dados experimentais, prossegue-se com a construção de uma curva de calibração, visível na figura 4.8, baseada na interpolação dos dados recolhidos, verificando a linearidade dos pontos. Assim sendo passou-se a ter uma relação entre a força aplicada no sensor de carga e a extensão medida nos extensómetros.

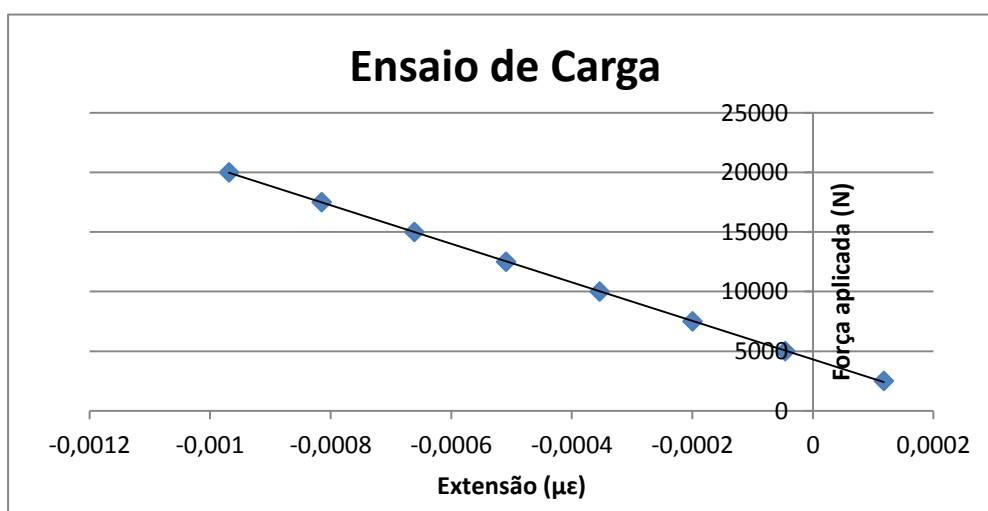


Figura 4.8 – Curva de calibração do ensaio de carga do sensor de carga.

Com a interpolação linear dos pontos experimentais obtidos, é fácil escrever a equação 4.5 que permite converter os valores de extensão em força aplicada.

$$\text{força aplicada.carga} = -1616.7748,633 \times \text{extensão} + 4305,059 \quad (4.5)$$

$$R^2 = 99,99\% \quad (4.5)$$

É importante realçar que o coeficiente de determinação (R^2), equação 4.6, está bastante próximo dos cem por cento, o que significa um bom funcionamento do sensor de carga, do método de calibração e de uma óptima curva de calibração.

4.2.2 Ensaio de descarga

Imediatamente após o ensaio de carga, foi realizado o ensaio de descarga, que consiste em rodar o manípulo da máquina de ensaios no sentido contrário dos ponteiros dos relógios (figura 4.9).

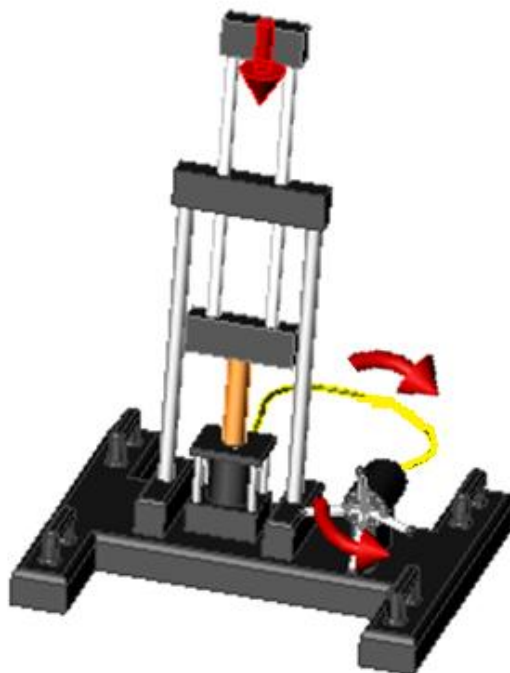


Figura 4.9– Movimento/ensaio de descarga para a calibração do sensor de carga.

Durante o ensaio de descarga, foram retirados sete pares de valores de extensão e de força, ilustrados na tabela 4.4, e de seguida realizado o tratamento numérico, como nos ensaios anteriores.

Tabela 4.4– Ensaio de descarga/calibração sensor de carga.

Nº de pontos	Carga aplicada (N)	Valores médios das extensões ($\mu\epsilon$)
1	2500	8,69292E-05
2	5000	-8,2901E-05
3	10000	-0,00041143
4	12500	-0,0005689
5	15000	-0,00072008
6	17500	-0,00086315
7	20000	-0,00097572

Tal como no ensaio anterior, é recolhido os dados experimentais e elaborado uma curva de calibração baseada na interpolação linear, demonstrada pela figura 4.10.

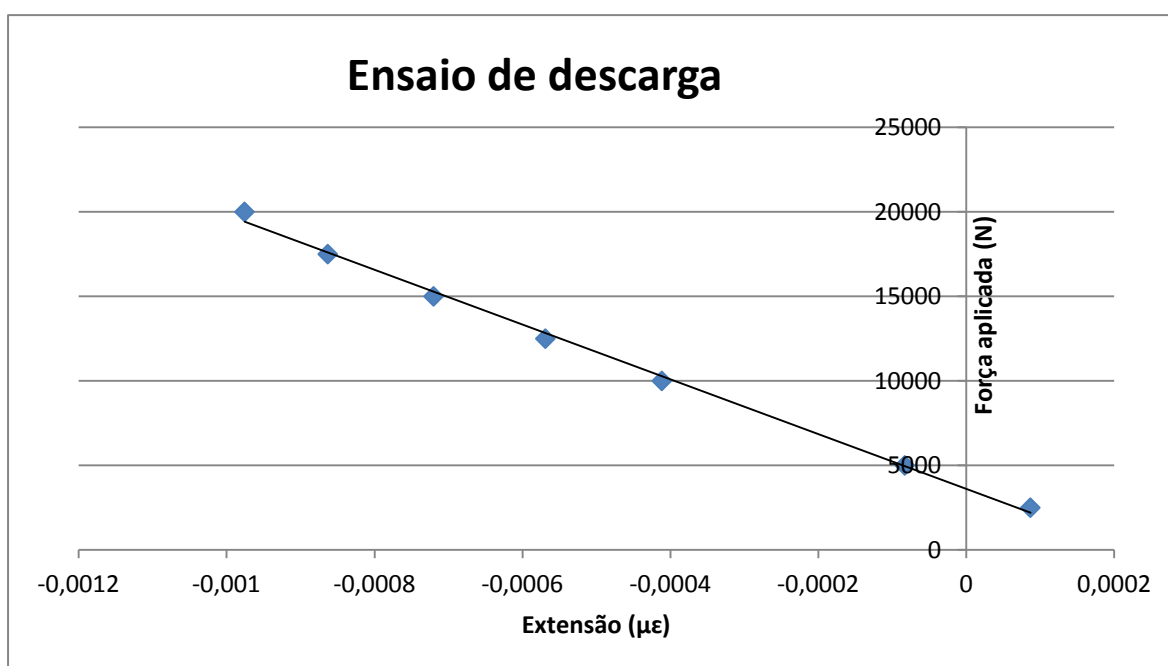


Figura 4.10 – Curva de calibração do ensaio de descarga do sensor de carga.

Realizando a interpolação linear sobre estes dados obteve-se a equação 4.7, que permite converter os valores de extensão em força aplicada.

$$força\ aplicada.descarga = -1618.9889,870 \times extensão + 3609,207 \quad (4.7)$$

$$R^2 = 99,72\% \quad (4.8)$$

Tal como no sensor de deslocamento, averigua-se o comportamento do sensor de carga durante o ensaio de carga e descarga, para o tal foi necessário verificar se as curvas de calibração são coincidentes, realizada através da visualização do gráfico da figura.

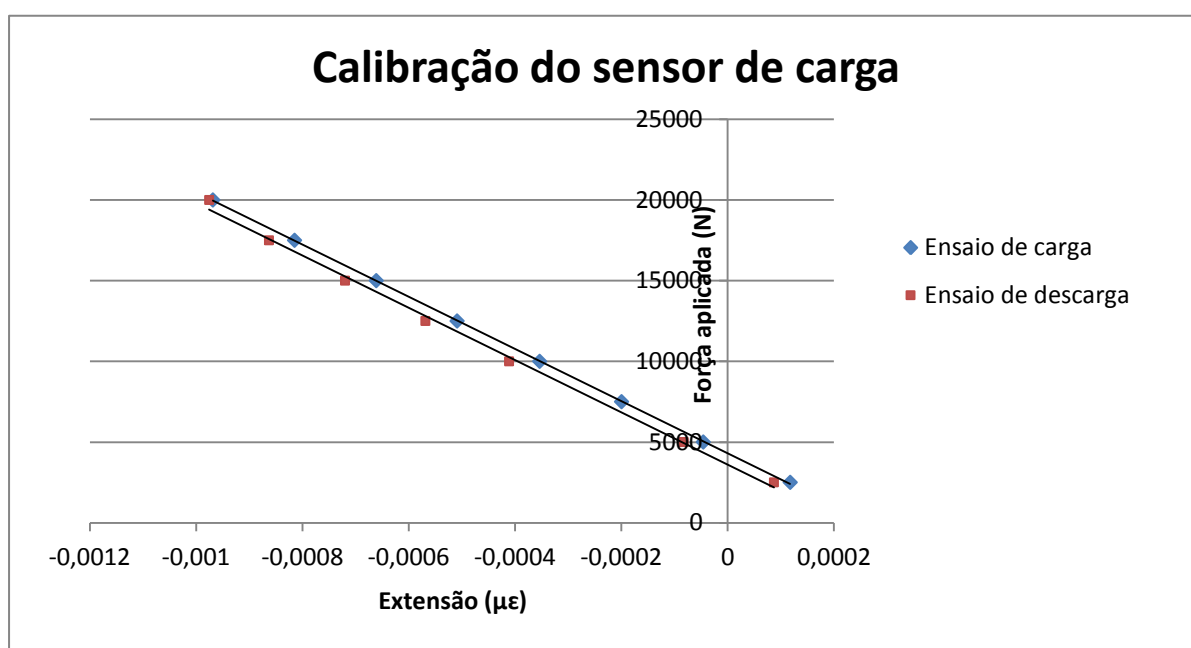


Figura 4.11 –Curvas de calibração do sensor de carga.

Da análise da figura 4.11, conclui-se que as curvas de calibração são concorrentes e não coincidentes, o que significa que ocorre o fenómeno de histerese no comportamento do sensor durante os ensaios de carga e descarga. O aparecimento do fenómeno é explicado pela dificuldade que foi calibrar o sensor de carga. Visto que a força é aplicada através do manuseamento do manípulo do actuador cilíndrico e a sua leitura feita através da visualização do manómetro. Quer o manípulo quer a escala do manómetro, não permitem retirar valores precisos da força aplicada.

Visto que as curvas de calibração não são coincidentes, optou-se por escolher a curva que apresenta o maior valor de coeficiente de determinação, ou seja, a curva de calibração do ensaio de carga.

4.3 Carga e deslocamento residual

O sensor de carga foi colocado sobre o cabeçote superior e seguro através do veio passante, que por sua vez foi aparafusado à parte superior do provete. Depois de montado e ligado ao sistema de aquisição de dados, foi efectuado uma leitura, com o programa desenvolvido em Labview, do sensor sem nenhuma carga, com o objectivo de obter a carga residual do sensor para posteriormente ser inserido no programa aquando se realizar um ensaio.

Tal como o sensor de carga, também foi realizado uma leitura, com o programa desenvolvido em Labview, do sensor de deslocamento simplesmente fixado, através de molas, ao provete na zona de secção constante e devidamente ligado ao sistema de aquisição. Com o intuito de obter o deslocamento residual do sensor para posteriormente ser inserido no programa aquando se realizar um ensaio de tracção.

Capítulo 5

Neste capítulo pretende-se explicar de forma sucinta os ensaios realizados, a forma como se procedeu à montagem experimental, os resultados obtidos e as conclusões retiradas dos ensaios.

5.1 Montagem

5.1.1 Montagem do sensor de carga

A montagem do sensor de carga na máquina de ensaios de tracção e de compressão é ilustrada pela figura 5.1. Pode observar-se, através da análise da figura 5.1, que o sensor de carga se adequa harmoniosamente às dimensões da máquina de ensaios.

Como foi anteriormente descrito no capítulo 2, o sensor de carga, durante o ensaio de tracção, é colocado sobre o cabeçote superior e seguro através de um veio passante, veio este que por sua vez é aparafusado à parte superior do provete. Por razões de estética e para facilitar o manuseamento do manípulo da máquina de ensaios, os cabos de ligação entre o sensor e o sistema de aquisição, foram colocados na parte traseira da máquina de ensaios.

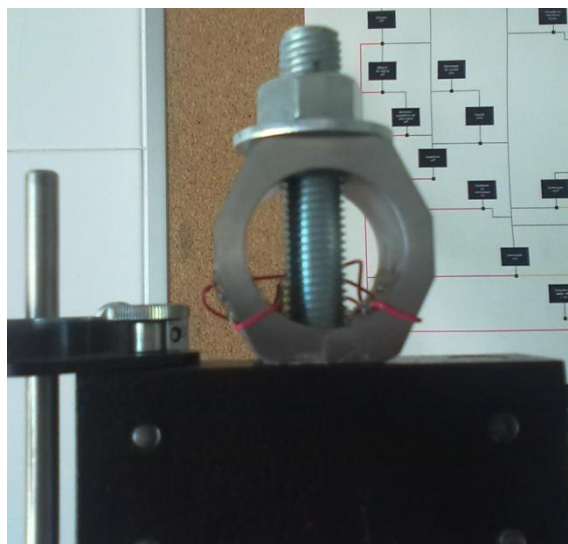


Figura 5.1 – Montagem do sensor de carga.

5.1.2 Montagem do sensor de deslocamento

A montagem do sensor de deslocamento, conforme ilustrado na figura 5.3, requer a sua fixação, através de molas, ao troço de secção constante do provete (exemplificado na figura 5.2 como L_0) e depois retirar o acessório que se encontra fixo as lâminas do sensor. Contudo, antes de fixar o sensor de deslocamento ao provete, é necessário prender o provete aos parafusos de suporte, conforme se pode ver na figura 5.3.

Mais uma vez, por razões de estética, os cabos de ligação entre o sensor de deslocamento e o sistema de aquisição, foram colocados na parte de trás da máquina de ensaios.

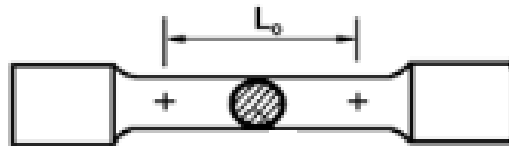


Figura 5.2 – Desenho de um provete.



Figura 5.3 – Montagem do sensor de deslocamento.

Depois de efectuado o ensaio de tracção, segue-se a fase de arrumação do sensor. Esta consiste em colocar entre as ranhuras do acessório (figura 3.6) as lâminas do sensor de deslocamento, conforme visível na figura 5.4.

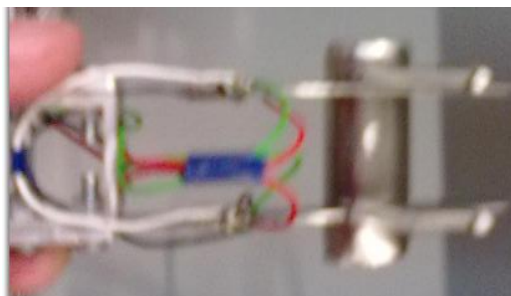


Figura 5.4 – Montagem do acessório no sensor de deslocamento.

5.1.3 Montagem final

Visível na imagem 5.5, a montagem final é constituída pela máquina de ensaios de tracção e de compressão, os sensores de carga e de deslocamento, o sistema de aquisição da National Instruments e o computador.

Através da análise da figura 5.5 verifica-se que o sistema de aquisição da National Instruments foi colocado o mais próximo possível da máquina de ensaios, isto devido ao tamanho dos cabos (blindados) que fazem a ligação entre os sensores e o sistema de aquisição.



Figura 5.5 – Montagem final dos sensores e provete na máquina de ensaios de tracção e compressão.

5.2 Resultados

5.2.1 Ensaio de um provete de cobre

Após realizada a montagem final, figura 5.6, realizou-se um ensaio de tracção. Neste ensaio de tracção é utilizado um provete de cobre e têm-se como objectivo traccionar o provete até à sua rotura.

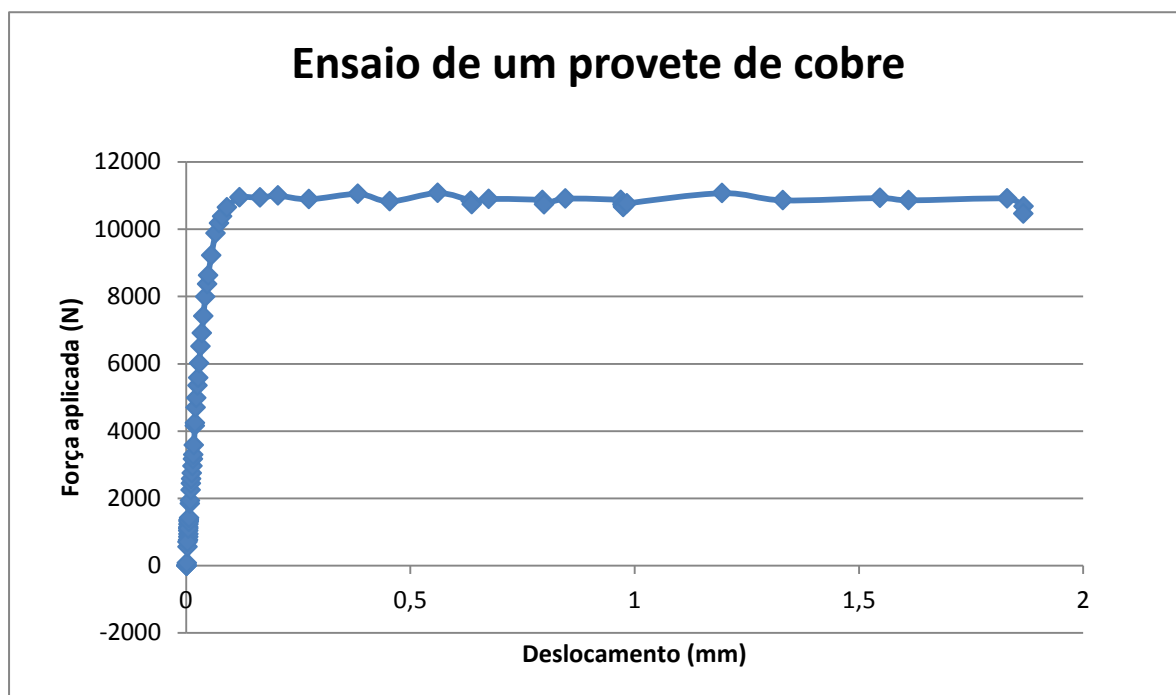


Figura 5.6 – Ensaio de tracção de um provete de cobre.



Figura 5.7 – Provete de cobre traccionado.

Através da análise das figuras 5.6 e 5.7 podem ser verificados alguns aspectos considerados de interesse:

- As flutuações dos pares de valores de força e extensão são devidos ao mecanismo da máquina de ensaios, ou seja, ao facto desta máquina ser de accionamento manual, porque no intervalo entre rotações efectuadas através do manípulo, o provete tende sempre a recuperar a deformação elástica.
- O provete inicia a redução de área, o fenómeno de estrição, próximo da zona de secção não constante do provete, por outras palavras junto à zona de rosca. Não foi por isso possível registar correctamente o ensaio a partir do momento em que se iniciou a estrição do provete por esta se encontra fora do alcance das lâminas do sensor de deslocamento.

5.2.1 Ensaio de um provete de latão

Com o objectivo de confirmar as conclusões retiradas através do ensaio de tracção do provete de cobre, executa-se um novo ensaio num provete de latão.

A finalidade do ensaio de tracção do provete de latão é igual ao ensaio anterior, ou seja, pretende-se com este ensaio traccionar o provete até a rotura do mesmo.

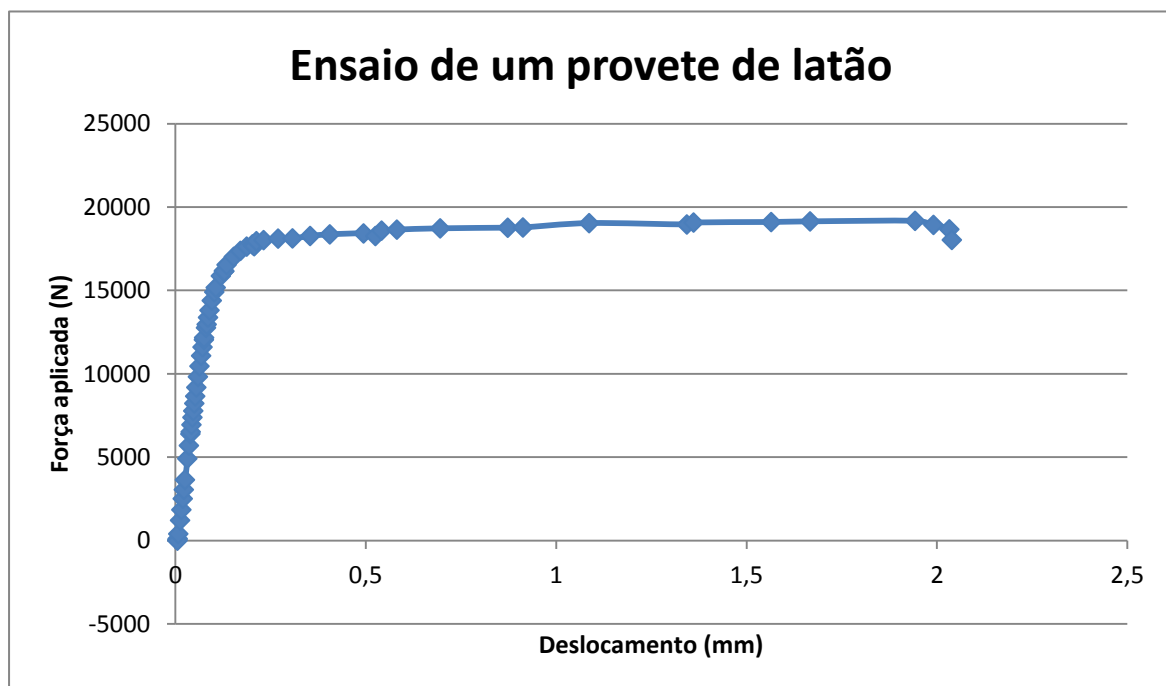


Figura 5.8 – Ensaio de tracção do provete de latão.

Comprova-se, através das imagens 5.8 e 5.9, as mesmas conclusões do ensaio de tracção do provete de cobre.



Figura 5.9 – Provete de latão traccionado.

Em sùmula, não foi possível registar correctamente a fase final dos ensaios de tracção, devido à dificuldade de prever a zona onde ocorre a estricção do provete. Contudo, todo o ensaio registado antes de ocorrer estricção é válido, e a partir dos dados adquiridos podem ser obtidos os valores precisos para o módulo de elasticidade, tensão limite de proporcionalidade e tensão de ruptura.

5.2.3 Ensaio de um provete de aço

Sendo difícil realizar um ensaio de tracção de um provete até à rotura de forma a registar a fase final de estricção, opta-se por realizar um ensaio de tracção, através de um provete de aço, até o limite do domínio elástico, o que significa que o ensaio acaba antes de entrar em regime plástico.

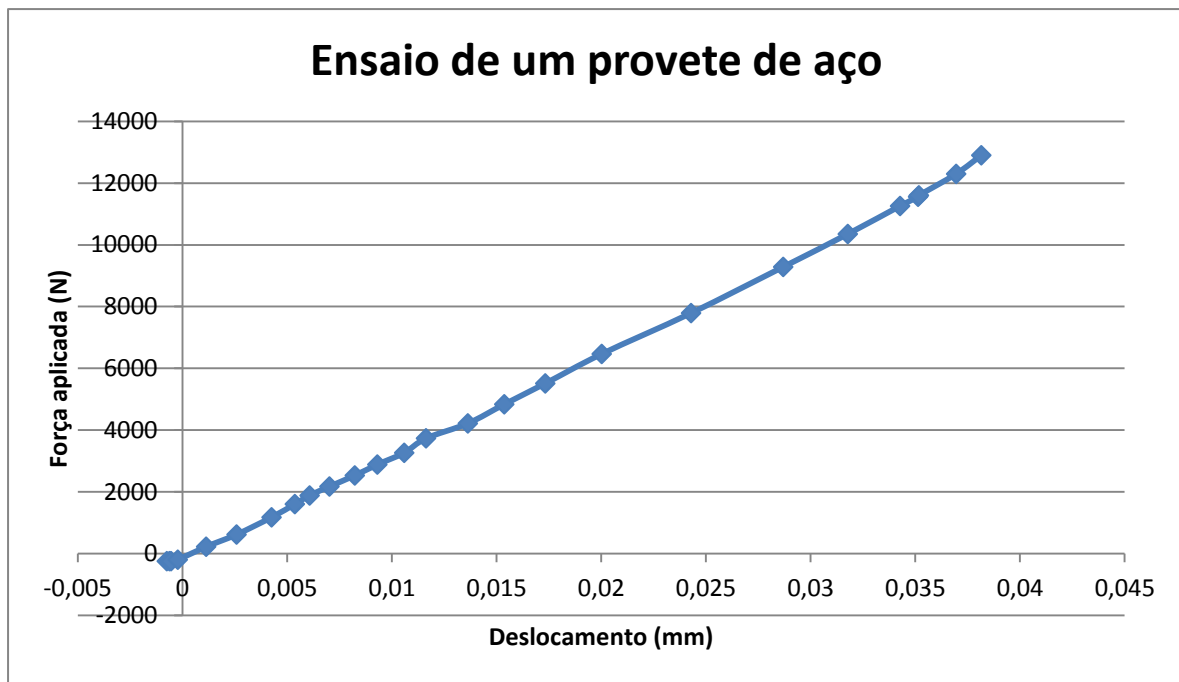


Figura 5.10 – Ensaio de tracção do provete de aço.

Na figura 5.10 está ilustrado o ensaio de tracção do provete de aço. Dada a linearidade do ensaio conclui-se que sensores de carga e deslocamento funcionam perfeitamente no domínio elástico do provete.

O cálculo do módulo de elasticidade (E) permite comprovar o funcionamento do conjunto dos dois sensores, para isso foi necessário retirar do gráfico (figura 5.10) dois pares de valores de força e de deslocamento.

Antes de efectuar o cálculo do módulo de elasticidade, foi necessário medir a distância inicial entre as lâminas do sensor de deslocamento depois de fixado ao provete, medida essa de 19,8 milímetros (l_0). De seguida, através da equação 5.1, foi calculado o módulo de elasticidade, onde o raio da secção transversal do provete é de 3 milímetros.

$$E = \frac{\frac{\Delta F}{A}}{\frac{\Delta l}{l_0}} \quad (5.1)$$

$$E = \frac{\frac{(12900,029 - 224,804)}{\pi \times 0,003^2}}{\frac{(0,03815 - 0,00122) \times 10^{-3}}{0,01980}} \cong 240,35 \text{ GPa}$$

Por falta de conhecimento do módulo de elasticidade do provete não se pode concluir quanto à veracidade do cálculo efectuado, contudo pode-se concluir que o valor do módulo de elasticidade, obtido experimentalmente, é superior ao valor típico dos aços, cerca de 210 GPa.

Capítulo 6

Neste capítulo pretende-se realizar uma avaliação final de todo o trabalho desenvolvido, sobre o que correu de acordo com o esperado, os problemas encontrados e propor melhores soluções para esses problemas.

6.1 Conclusões

Nos diversos capítulos desta dissertação foram mencionadas algumas conclusões relativas a opções intermédias do projecto e da calibração dos sensores, no entanto serão novamente referidas para uma apreciação final.

Em primeiro lugar, há que salientar as dificuldades de construção dos sensores, evidenciando a dificuldade de conciliar as tecnologias existentes nos laboratórios, quer de Tecnologia Mecânica quer de Mecânica Estrutural, que obrigou à alteração do projecto do sensor de carga devido à ferrugem superficial do cilindro, de onde é “extraído” e das combinações de equipamentos para a construção e montagem dos sensores, mencionadas nos capítulos dois e três.

Apesar de simples, a montagem efectuada para calibrar o sensor de deslocamento, descrita no capítulo quatro, revelou-se eficaz, e graças à utilização do micrómetro conseguiu-se obter uma resolução de duas casas decimais do milímetro

O processo utilizado para calibrar o sensor de carga não apresenta uma resolução adequada, pois envolve a utilização da máquina de ensaios de tracção e de compressão. Os valores da força aplicada sobre o sensor, durante a calibração, são realizados através do manuseamento do manípulo do actuador cilíndrico e retirados através da visualização do manómetro, que por sua vez quer a escala do manómetro, quer o manuseamento do manípulo não são precisos. Contudo no momento era a única opção para calibrar o sensor.

Como descrito no capítulo quatro, são realizados, ensaios de carga e descarga para ambos os sensores, de modo a averiguar se para cada um deles, se verifica a coincidência entre as curvas de carga e descarga como se pretendia. Verificando-se que eram muito semelhantes escolheram-se as curvas que apresentavam melhor linearidade.

Durante os ensaios de tracção e através da análise posterior dos dados retirados, conclui-se que os sensores funcionam perfeitamente em conjunto, contudo para os provetes ensaiados, não foi possível

obter os valores correctos da deformação do provete até à ruptura, uma vez que, para todos os provetes ensaiados, esta ocorreu fora da zona de colocação do sensor, situação esta que não se previa e se pensa dever a um defeito dos provetes.

Por falta de conhecimento do módulo de elasticidade do provete, não se pode concluir quanto à veracidade do módulo de elasticidade calculado experimentalmente, através do ensaio de tracção do provete de aço.

6.2 Trabalhos futuros

Através da experiência adquirida durante a realização dos trabalhos relatados nesta dissertação, constatou-se a necessidade de melhorar vários parâmetros da construção dos sensores. Trata-se de detalhes cuja importância só foi percebida depois dos ensaios realizados e após verificar as agressões ambientais a que os sensores ficam sujeitos.

A principal alteração em relação ao sensor de carga é devida ao ambiente em que se encontra o laboratório. De facto as instalações do DEMI situam-se próximo do oceano atlântico, o que implica que o ar seja mais salino e esta propriedade implica um acréscimo de oxidação do sensor. Por isso poderia prever-se a escolha de outro material, resistente à oxidação, ou a realização de um tratamento anti-oxidação no sensor construído.

Para prolongar a vida útil dos sensores e evitar possíveis danos poderá ser construída uma caixa para cada um dos sensores.

É importante realizar novas calibrações de ambos os sensores assim que estiverem disponíveis condições apropriadas (célula de carga padrão).

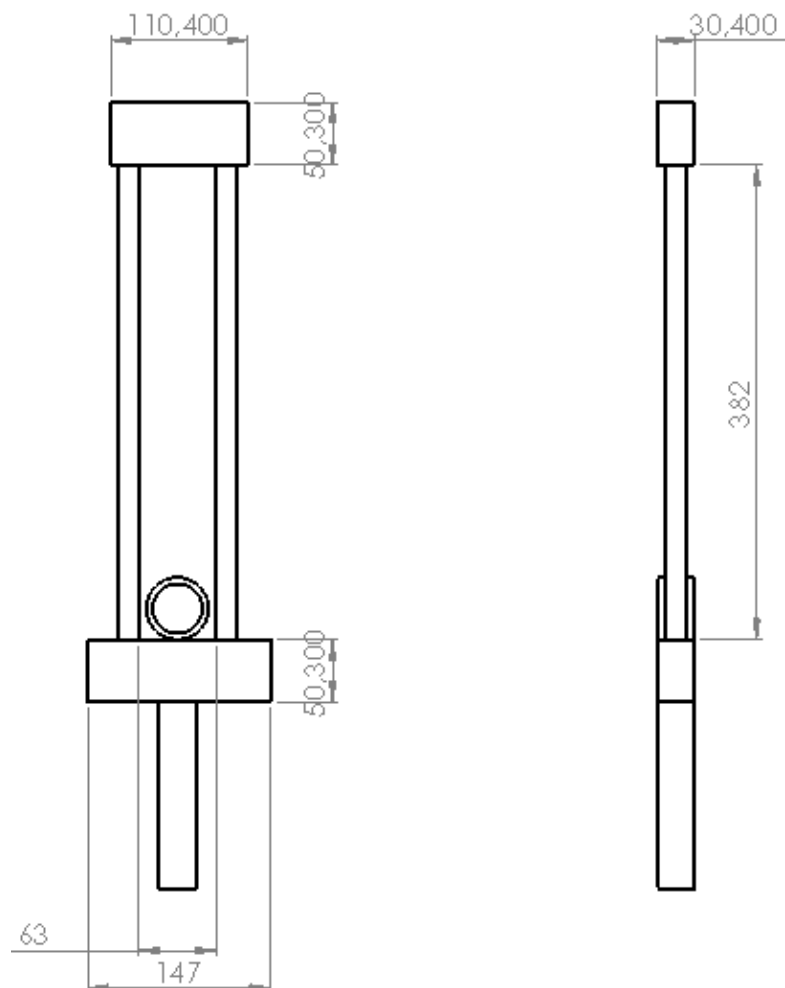
7 Bibliografia

- [1] R. Andolfato, J. Camacho and G. Brito, “Extensometria Básica”, Universidade Estadual Paulista (2004)
- [2] A. Urgueira, “Fundamentos de Extensometria Eléctrica”, Faculdade Ciências e Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica
- [3] A. Portela and A. Silva, “Mecânica dos Materiais”, Edição Plátano, Lisboa
- [4] C. A. Moura Branco, “Mecânica dos Materiais”, Edição da Fundação Calouste Gulbenkian.
- [5] Cook, N.H. and E. Rabinowicz, “Physical Measurement and Analysis”, Addison-Wesley Pub. Co.
- [6] G. Whan, J. Phillips, S. Bullock, R. J. Runciman, S. Pearce and M. Hurtig, “Development and testing a modular strain measurement clip”, Jornal of Biomechanics nº 36 (2003).
- [7] N. A. Fleck, “Some aspects of clip gauge design”, Cambridge University Engineering Department.
- [8] F. P. Berr, E. R. Johnston, JR and J. T. D. McGraw-Hill, “Mechanics of Material”, 3rd Edition

8 Anexos

1 Representação da máquina de ensaios de tracção/compressão

Desenho da base móvel, onde são colocado os sensores.



2 Desenho do veio passante

O desenho do veio passante encontra-se impresso na folha seguinte.

Nota: O desenho do veio passante foi redimensionado para ser impresso numa folha A4, o que implica que não possui a escala nele indicada.

3 Material de análise

O material usado para o estudo dos sensores de carga (paralelepipedico, anel, octedrico V.1 e V.2) foi o AISI 1020, apresenta as seguintes características.

Tabela 3.1 – Características mecânicas do aço AISI 1020.

Características mecânicas do aço			
Tensão de cedência (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de poisson
351.6	420.5	200	0.29

4 Desenho do sensor paralelepípedo

O desenho do sensor paralelepípedo encontra-se impresso na folha seguinte.

Nota: O desenho do sensor paralelepípedo foi redimensionado para ser impresso numa folha A4, o que implica que não possui a escala nele indicada.

5 Lista de comandos do sensor paralelepipedico

Lista de comandos da análise efectuado através do ANSYS para o sensor paralelepipedico.

! Modelação do Sensor de Carga no ANSYS

!

! Tese de Mestrado de Felipe Santos, 2011

!

/PREP7

!

! Elemento finito brick 20 Nós

!

ET,1,SOLID186

!

! Propriedades do material

!

MP,EX,1,210E9

MP,PRXY,1,0.3

!

! Criação da geometria

!

BLOCK,0,0.05,0,0.05,0,0.03,

CYL4,0.025,0.025,0.022, , , ,0.030

!

! Subtração do cilindro 1

!

VSBV, 1, 2

!

/VIEW,1,1,1,1

/ANG,1

/REP,FAST

!

! Mudança do working plane

!

LWPL,-1,8,_Z2

!

! Criação do cilindro 2

!

CYL4,0.025,-0.015,0.0085, , , ,0.050

!

! Subtração do cilindro

!

VSBV, 3, 1

!

! Mudança para o working plane original

!

VPLOT

WPCSYS,-1,0

WPSTYLE,,,,,,,,,0

!

! Malhagem

!

```

SMRT,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 2
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!
! Condições fronteira
!
BLOCK,-0.025,0.075,-0.05,0,0,0.030,
BLOCK,-0.025,0.075,0.05,0.10,0,0.03,
!
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.1
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,21
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,2,-1
TYPE,2
AMESH,ALL
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,17
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)

```



```

ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
/USER, 1
/VIEW, 1, 0.512227458677 , 0.356290295464 , 0.781460335484
/ANG, 1, -5.75723076620
/REPLO
/VIEW, 1, 0.409259038588 , 0.611263301340E-01, 0.910368393069
/ANG, 1, -7.47394038119
/REPLO
/VIEW, 1, 0.362467801293 , 0.279879383746 , 0.888979540586
/ANG, 1, -7.72322082439
/REPLO
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!*
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.1
MAT,1

```

```

R,4
REAL,4
ET,4,170
ET,5,174
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,4
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,4,4,-1
TYPE,4
AMESH,ALL
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,18
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,4
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
/USER, 1
/VIEW, 1, 0.586134189517 , 0.388197524733 , 0.711160596258
/ANG, 1, -2.62196751156
/REPLO
/VIEW, 1, 0.570059781749 , 0.326524253911E-01, 0.820954118296
/ANG, 1, -3.25681658690
/REPLO
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM

```

```
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
/MREP,EPLT
ALLSEL
/VIEW,1,1,1,1
VPLT
!
! Condições fronteira deslocamento
!
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,21
!*
/GO
DA,P51X,UY,-0.00003
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,4
!*
/GO
DA,P51X,UY,0
!
! Solução
!
/SOL
NSUBST,20,0,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,LIST,999
PLNSOL,S,EQV
!*
ANCNTR,10,0.5
/VIEW,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
PLNSOL,S,EQV
!*
ANCNTR,10,0.5
!
! end of file
```


6 Desenho do anel de carga

O desenho do anel de carga encontra-se impresso na folha seguinte.

Nota: O desenho do anel de carga foi redimensionado para ser impresso numa folha A4, o que implica que não possui a escala nele indicada.

7 Lista de comandos do anel de carga

Lista de comandos da análise efectuado através do ANSYS para o anel de carga.

```
!  
! Modelacao do Sensor de Carga no ANSYS  
!  
! Modelo anel de carga  
!  
! Tese de Mestrado de Felipe Santos, 2011  
!  
/PREP7  
!  
! Elemento finito brick 20  
!  
ET,1,SOLID186  
!  
! Propriedades do material  
!  
MP,EX,1,210E9  
MP,PRXY,1,0.3  
!  
! Criacao da geometria  
!  
CYL4,0.025,0.025,0.025, , , 0.030  
CYL4,0.025,0.025,0.020, , , 0.030  
!  
VSBV, 1, 2  
/VIEW,1,1,1,1  
!  
!*  
SMRT,6  
SMRT,1  
MSHAPE,1,3D  
MSHKEY,0  
!*  
CM,_Y,VOLU  
VSEL, , , , 3  
CM,_Y1,VOLU  
CHKMSH,'VOLU'  
CMSEL,S,_Y  
!*  
VMESH,_Y1  
!*  
CMDELE,_Y  
CMDELE,_Y1  
CMDELE,_Y2  
!*  
/UI,MESH,OFF  
!  
!  
FLST,2,8,1,ORDE,8  
FITEM,2,202  
FITEM,2,204
```

```

FITEM,2,206
FITEM,2,208
FITEM,2,210
FITEM,2,212
FITEM,2,214
FITEM,2,216
!*
/GO
F,P51X,FX,2000
!
FLST,2,2,1,ORDE,2
FITEM,2,3
FITEM,2,7
!*
/GO
F,P51X,FX,2000
!
!*
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,10
!*
/GO
DL,P51X, ,ALL,
!
FLST,2,2,1,ORDE,2
FITEM,2,3
FITEM,2,7
!*
/GO
D,P51X, , , , ,UY, , , , ,
!
!
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
/USER, 1
/REPLO
FINISH
!

```


8 Desenho do sensor octaédrico V.1

O desenho do sensor octaédrico V.1 encontra-se impresso na folha seguinte.

Nota: O desenho do sensor octaédrico V.1 foi redimensionado para ser impresso numa folha A4, o que implica que não possui a escala nele indicada.

9 Lista de comandos do sensor octaédrico V.1

Lista de comandos da análise efectuado através do ANSYS para o sensor octaédrico V.1.

```
Modelacao do Sensor de Carga no ANSYS
!
! Modelo do sensor octogonal V.1.
!
! Tese de Mestrado de Felipe Santos, 2011
!
/PREP7
!
! Elemento finito brick 20
!
ET,1,SOLID186
!
! Propriedades do material
!
MP,EX,1,210E9
MP,PRXY,1,0.3
!
! parametros que definem a geometria
!
D1= 0.030
D2= (0.050-D1)/2
D3= 0.005
!
K,1,D2,-D3,0
K,2,0.050-D2,-D3,0
K,3,0.050,D2,0
K,4,0.050,0.050-D2,0
K,5,0.050-D2,0.050+D3,0
K,6,D2,0.050+D3,0
K,7,0,0.050-D2,0
K,8,0,D2,0
!
A,1,2,3,4,5,6,7,8
CYL4,0.025,0.025,0.020
!
ASBA, 1, 2
!
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,3
VEXT,P51X, , ,0,0,0.030,,,
!
KWPLAN,-1, 18, 17, 5
CYL4,0.025-D2,0.015,0.0085,,,,-0.050-2*D3
WPCSYS,-1,0
WPSTYLE,,,,,,,,,0
!
VSBV, 1, 2
```

```

!
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
!
K,101,0,-D3,0
K,102,0.050,-D3,0
K,103,0.050,-D3,0.030
K,104,0,-D3,0.030
!
A,101,102,103,104
!
BLOCK,0.010,0.040,0.050+D3,0.060+D3,0.0,0.030,
!
ESIZE,0.003,0,
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 3
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!
ESIZE,0.003,0,
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
/UI,MESH,OFF
!
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU

```

```

/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.05
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,2
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,2,-1
TYPE,2
AMESH,ALL
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,27
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
/USER, 1
/FOC, 1, 0.271426340585E-01, 0.221900154724E-01, 0.206673504691E-01
/REPLO
/VIEW, 1, 0.638624109279 , -0.101919245620 , 0.762739611151
/ANG, 1, -0.190120055009
/REPLO
/VIEW, 1, 0.484101905917 , -0.152528911769 , 0.861614923131
/ANG, 1, 1.12172926938
/REPLO
/VIEW, 1, 0.246966498505 , 0.379259535583E-01, 0.968281555470
/ANG, 1, 1.66077765069
/REPLO
/VIEW, 1, -0.597900382285E-02, 0.187919793862 , 0.982166178703
/ANG, 1, 0.585601303850E-01
/REPLO
/VIEW, 1, 0.132281419727 , -0.793382137671E-01, 0.988031919440
/ANG, 1, 0.749695172644

```

```

/REPLO
/VIEW, 1, 0.171829895359 , -0.265151412351 , 0.948772478305
/ANG, 1, 0.289268371466
/REPLO
/VIEW, 1, 0.828146270297E-01, -0.425525162531 , 0.901149307053
/ANG, 1, 2.14749235695
/REPLO
/VIEW, 1, 0.103967455314 , -0.888329826503E-01, 0.990605607408
/ANG, 1, 1.95099963774
/REPLO
/VIEW,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
! Reverse target normals
CM,_Y,AREA
ASEL,,, 2
CM,_YLN,LINE
CM,_YEL,ELEM
CM,_YND,NODE
LSLA,S,1
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESEL,R,REAL,,_REALID
ESURF,,REVERSE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_YLN
CMSEL,S,_YEL
CMSEL,S,_YND
CMDELE,_Y
CMDELE,_YLN
CMDELE,_YEL
CMDELE,_YND
/REPLOT
!*
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
/VIEW, 1, 0.943452945949 , 0.215899093365 , -0.251563352388
/ANG, 1, 1.56062693152
/REPLO
/VIEW, 1, 0.704340320519 , 0.721373381879E-01, -0.706187593583
/ANG, 1, 5.88044278383
/REPLO
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM

```

```

CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!*
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.05
MAT,1
R,4
REAL,4
ET,4,170
ET,5,174
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,12
CM,_TARGET,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,28
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)

```

```

ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!
EPLT
!
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,13
/GO
!*
SFA,P51X,1,PRES,20000/(0.030*0.030)
!
FINISH
!
! Solucao
!
/SOL
/STATUS,SOLU
NSUBST,10,0,0
SOLVE
FINISH
!
/POST1
!*
/VIEW,1,1,2,3
/ANG,1
/REP,FAST
/EFACET,1

```


PLNSOL, S,Y, 0,1.0

!*
!

! end-of-file

!

10 Desenho do sensor octaédrico V.2

O desenho do sensor octaédrico V.2 encontra-se impresso na folha seguinte.

Nota: O desenho do sensor octaédrico V.2 foi redimensionado para ser impresso numa folha A4, o que implica que não possui a escala nele indicada.

11 Lista de comandos do sensor octaédrico V.2

Lista de comandos da análise efectuado através do ANSYS para o sensor octaédrico V.2.

```
!  
! Modelacao do Sensor de Carga no ANSYS  
!  
! Modelo do sensor octogonal V.2  
!  
! Tese de Mestrado de Felipe Santos, 2011  
!  
/PREP7  
!  
! Elemento finito brick 20  
!  
ET,1,SOLID186  
!  
! Propriedades do material  
!  
MP,EX,1,210E9  
MP,PRXY,1,0.3  
!  
! parametros que definem a geometria  
!  
D1= 0.030  
D2= (0.050-D1)/2  
D3= 0.01  
!  
K,1,D2,-D3,0  
K,2,0.050-D2,-D3,0  
K,3,0.050,D2,0  
K,4,0.050,0.050-D2,0  
K,5,0.050-D2,0.050+D3,0  
K,6,D2,0.050+D3,0  
K,7,0,0.050-D2,0  
K,8,0,D2,0  
!  
A,1,2,3,4,5,6,7,8  
CYL4,0.025,0.025,0.020  
!  
ASBA, 1, 2  
!  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,3  
VEXT,P51X, , ,0,0,0.030,,,  
!  
KWPLAN,-1, 18, 17, 5  
CYL4,0.025-D2,0.015,0.0085,,,-0.050-2*D3  
WPCSYS,-1,0  
WPSTYLE,,,,,,,,,0  
!
```

```

VSBV, 1, 2
!
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
!
K,101,0,-D3,0
K,102,0.050,-D3,0
K,103,0.050,-D3,0.030
K,104,0,-D3,0.030
!
A,101,102,103,104
!
BLOCK,0.010,0.040,0.050+D3,0.060+D3,0.0,0.030,
!
ESIZE,0.003,0,
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 3
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!
ESIZE,0.003,0,
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
/UI,MESH,OFF
!
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA

```

```

CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.05
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,2
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,2,-1
TYPE,2
AMESH,ALL
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,27
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
/USER, 1
/FOC, 1, 0.271426340585E-01, 0.221900154724E-01, 0.206673504691E-01
/REPLO
/VIEW, 1, 0.638624109279 , -0.101919245620 , 0.762739611151
/ANG, 1, -0.190120055009
/REPLO
/VIEW, 1, 0.484101905917 , -0.152528911769 , 0.861614923131
/ANG, 1, 1.12172926938
/REPLO
/VIEW, 1, 0.246966498505 , 0.379259535583E-01, 0.968281555470
/ANG, 1, 1.66077765069
/REPLO
/VIEW, 1, -0.597900382285E-02, 0.187919793862 , 0.982166178703
/ANG, 1, 0.585601303850E-01
/REPLO
/VIEW, 1, 0.132281419727 , -0.793382137671E-01, 0.988031919440

```

```

/ANG, 1, 0.749695172644
/REPLO
/VIEW, 1, 0.171829895359 , -0.265151412351 , 0.948772478305
/ANG, 1, 0.289268371466
/REPLO
/VIEW, 1, 0.828146270297E-01, -0.425525162531 , 0.901149307053
/ANG, 1, 2.14749235695
/REPLO
/VIEW, 1, 0.103967455314 , -0.888329826503E-01, 0.990605607408
/ANG, 1, 1.95099963774
/REPLO
/VIEW,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
! Reverse target normals
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 2
CM,_YLN,LINE
CM,_YEL,ELEM
CM,_YND,NODE
LSLA,S,1
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESEL,R,REAL,,_REALID
ESURF,,REVERSE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_YLN
CMSEL,S,_YEL
CMSEL,S,_YND
CMDELE,_Y
CMDELE,_YLN
CMDELE,_YEL
CMDELE,_YND
/REPLOT
!*
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
/VIEW, 1, 0.943452945949 , 0.215899093365 , -0.251563352388
/ANG, 1, 1.56062693152
/REPLO
/VIEW, 1, 0.704340320519 , 0.721373381879E-01, -0.706187593583
/ANG, 1, 5.88044278383
/REPLO
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3

```



```

CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!*
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.05
MAT,1
R,4
REAL,4
ET,4,170
ET,5,174
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,12
CM,_TARGET,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,28
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0

```

```

NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!
EPLOT
!
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,13
/GO
!*
SFA,P51X,1,PRES,20000/(0.030*0.030)
!
FINISH
!
! Solucao
!
/SOL
/STATUS,SOLU
NSUBST,10,0,0
SOLVE
FINISH
!
/POST1
!*
/VIEW,1,1,2,3
/ANG,1
/REP,FAST

```

```
/EFACET,1  
PLNSOL, S,Y, 0,1.0  
!*  
! end-of-file  
!
```


12 Desenho do sensor octaédrico V.3

O desenho do sensor octaédrico V.3 encontra-se impresso na folha seguinte.

Nota: O desenho do sensor octaédrico V.3 foi redimensionado para ser impresso numa folha A4, o que implica que não possui a escala nele indicada.

13 Material de construção do sensor de carga V.3

O aço empregue na construção do sensor de carga, o aço G12 RED 60, fornecido pela empresa F. Ramada A Aços e Industriais S.A., apresenta as seguintes características.

Tabela 13.1 – Composição química do aço G12 RED 60.

Composição química do aço (%)							
C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	S	SI
0.30	2.00	0.45	0.40	2.00	Max. 0.035	Max. 0.035	Max. 0.040

Tabela 13.2– Características mecânicas do aço G12 RED 60.

Características mecânicas do aço	
Tensão de ruptura (MPa)	Tensão de cedência (MPa)
Min. 900	Min.700

14 Desenho do sensor de deslocamento

O desenho do sensor de deslocamento encontra-se impresso na folha seguinte.

Nota: O desenho do sensor de deslocamento foi redimensionado para ser impresso numa folha A4, o que implica que não possui a escala nele indicada.

15 Desenho do acessório do sensor de deslocamento

O desenho do acessório do sensor de deslocamento encontra-se impresso na folha seguinte.

Nota: O desenho do acessório do sensor de deslocamento foi redimensionado para ser impresso numa folha A4, o que implica que não possui a escala nele indicada.

16 Ligação dos extensómetros do sensor de carga em ponte completa de Wheatstone

A ligação dos extensómetros, do sensor de carga, em ponte completa de Wheatstone é efectuada de acordo com o esquema da figura 16.1, por sua vez os números representados correspondem com a numeração das faces do sensor de carga, visível na figura 16.2. Os fios (A, B, C e D) do sensor de carga são ligados conforma a figura 16.3.

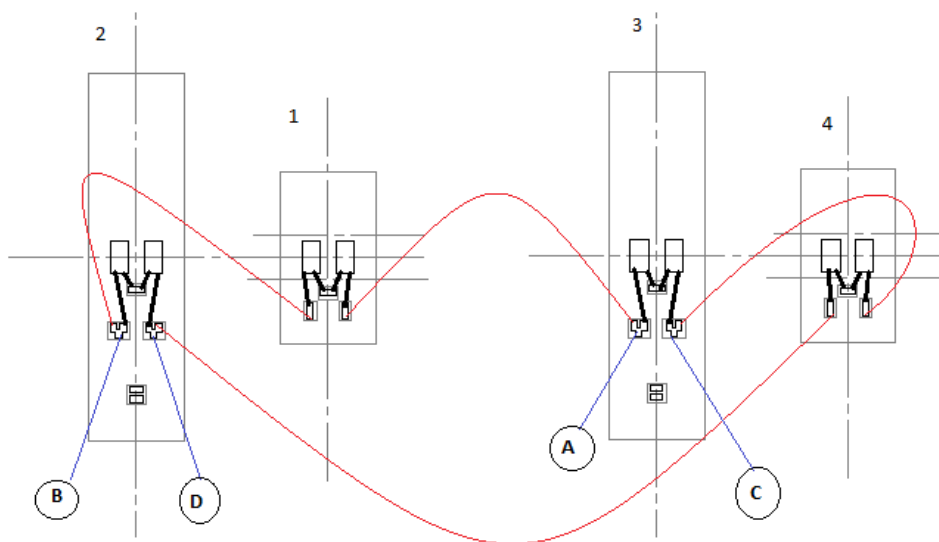


Figura 16.1 – Esquema de ligação em ponte completa de Wheatstone para o sensor de carga.

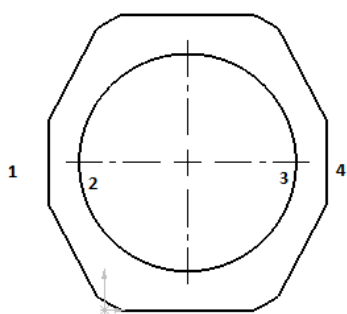


Figura 16.2 – Numeração das faces do sensor de carga.

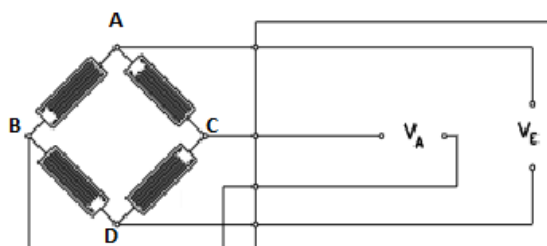


Figura 16.3 – Ligação dos fios na ponte completa de Wheatstone do sensor de carga.

17 Ligação dos extensómetros do sensor de deslocamento em ponte completa de Wheatstone

A ligação dos extensómetros, do sensor de deslocamento, em ponte completa de Wheatstone é efectuada de acordo com o esquema da figura 17.1, por sua vez os números representados correspondem com a numeração das faces do sensor de carga, visível na figura 17.2. Os fios (A, B, C e D) do sensor de deslocamento são ligados conforma a figura 17.3.

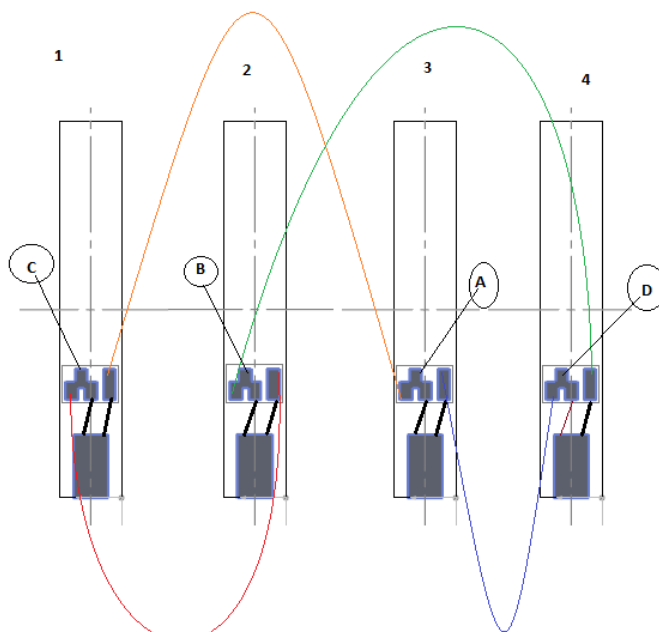


Figura 17.1 – Esquema de ligação em ponte completa de Wheatstone para o sensor de deslocamento.

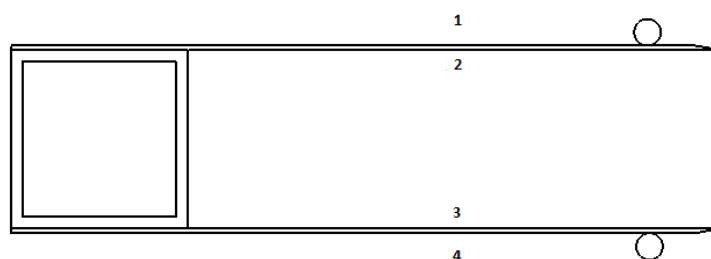


Figura 17.2 – Numeração das faces do sensor de deslocamento.

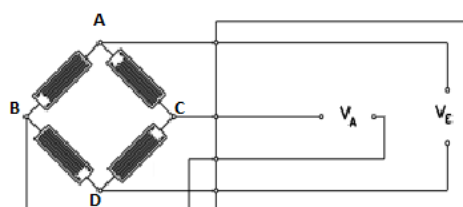


Figura 17.3 – Ligação dos fios na ponte completa de Wheatstone do sensor de deslocamento.

18 Diagrama de blocos do programa realizado em Labview

O diagrama de blocos do programa realizado em Labview encontra-se impresso na folha seguinte.

Nota: O diagrama de blocos do programa realizado em Labview foi impresso numa folha A3, para uma melhor visualização.

19 Painel frontal do programa realizado em Labview

O painel frontal do programa realizado em Labview encontra-se impresso na folha seguinte.

Nota: O painel frontal do programa realizado em Labview foi impresso numa folha A3, para uma melhor visualização.